

Univerzita Karlova
Přírodovědecká fakulta

Studijní program: Geografie
Studijní obor: Geografie a kartografie



Tereza Klímová

**URČOVÁNÍ VODNÍ HODNOTY SNĚHU Z DAT
MIKROVLNNÉHO RADIOMETRU**

**DETERMINATION OF SNOW WATER EQUIVALENT FROM MICROWAVE
RADIOMETER MEASUREMENTS**

Bakalářská práce

Vedoucí práce: doc. Ing. Jan Kolář, CSc.

Praha 2017

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci zpracovala samostatně a že jsem všechny použité prameny řádně citovala.

Jsem si vědoma toho, že případné použití výsledků získaných v této práci mimo Univerzitu Karlovu v Praze je možné pouze po písemném souhlasu této univerzity.

Svoluji k zapůjčení této práce pro studijní účely a souhlasím s tím, aby byla řádně vedena v evidenci vypůjčovatelů.

Ve Zdíkově, 14. 5. 2017

.....

Tereza Klímová

Poděkování

Na tomto místě bych chtěla poděkovat především vedoucímu mé práce doc. Ing. Janu Kolářovi, CSc. za cenné rady a připomínky. Dále bych chtěla poděkovat rodině a přátelům za podporu během celé doby studia.

URČOVÁNÍ VODNÍ HODNOTY SNĚHU Z DAT MIKROVLNNÉHO RADIOMETRU

Abstrakt

Vodní hodnota sněhu vyjadřuje množství vody ve sněhu a její znalosti pomáhají například v předpovídání povodní. Tato práce se zabývá zjišťováním vodní hodnoty sněhu z dat mikrovlnného radiometru za pomoci dat z pozemních stanic. Vybráno bylo území Norska z důvodu dobré dostupnosti dat. Jako základní instrument byl použit radiometr AMSR2 na japonské družici GCOM. Pro tvorbu map s údaji o vodní hodnotě sněhu byla použita metoda uvažující rozdíly dvou spektrálních kanálů a další vlastnosti sněhu. Při ověření vhodnosti této metody byly k porovnání využity mapy od Norského meteorologického institutu a EUMETSATu, který využívá k tvorbě map jinou metodu. Výsledkem jsou mapy vodní hodnoty sněhu s využitím dat mikrovlnného radiometru.

klíčová slova: vodní hodnota sněhu, dálkový průzkum Země, mikrovlnný radiometr

DETERMINATION OF SNOW WATER EQUIVALENT FROM MICROWAVE RADIOMETER MEASUREMENTS

Abstract

Snow water equivalent ammount of water in snow and its knowledge helps for example in flood prognostication. This bachelor thesis engages with determination of snow water equivalent from microwave radiometer's data in cooperation with data from ground stations. Norway was choosen because of its good data availability. Microwave radiometer AMSR2 on Japanese satellite GCOM has been used as a basic instrument. For map creation with snow water equivalent method considering differences of two spectral canals and other snow attributes were used. During verification of this method maps from Norwegian Meteorological Institute and EUMETSAT which provils different method in map creation were used.

keywords: snow water equivalent, remote sensing, microwave radiometer

Obsah

Přehled použitých zkratk	6
Seznam obrázků, tabulek a grafů	7
1. Úvod	8
2. Vodní hodnota sněhu a dálkový průzkum Země	10
2.1 Sníh a jeho vlastnosti	10
2.2 Dálkový průzkum Země	11
2.2.1 Spektrální charakteristiky sněhu	13
2.2.2 Problematika výpočtu vodní hodnoty sněhu z dat mikrovlnných radiometrů	15
2.2.3 HUT snow emission model a další modely zjišťující vodní hodnotu sněhu z dat mikrovlnných radiometrů	17
2.2.4 Radiometry používané ke zjišťování vodní hodnoty sněhu	18
2.2.4.1 Radiometr AMSR-E na satelitu Aqua	18
2.2.4.2 SSM/I a SSMIS mise na satelitu DMSP	19
2.2.4.3 Údaje o radiometru AMSR2 na satelitu GCOM-W1	19
2.3 Instituce	20
3. Data a metodika	23
3.1 Data	23
3.2 Metodika	24
4. Zpracování dat a výsledky	26
5. Diskuze	33
5.1 Data a metodika	33
5.2 Porovnání výsledků s interpolovanými mapami pozemního měření	33
5.3 Porovnání s metodou EUMETSATu	36
6. Závěr	39
Seznam použité literatury	40
Seznam příloh	44

Přehled použitých zkratk

AMSR-E	Advanced Microwave Scanning Radiometer – Earth Observing System
AMSR2	Advanced Microwave Scanning Radiometer 2
AVHRR	Advanced Very High Resolution Radiometer
ČHMÚ	Český hydrometeorologický ústav
DMSP	Defence Meteorological Satellite Program
DPZ	Dálkový průzkum Země
EUMETSAT	The European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites
GCOM-W1	Global Change Observation Mission Water
GHz	Gigahertz
GOES	Geostationary Operational Environmental Satellite
HUT	Helsinki University of Technology
IR	InfraRed
JAXA	Japan Aerospace Exploration Agency
MCC	Mission Control Centre
MODIS	Moderate Resolution Imaging Spectrometer
MW	MicroWave
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
NSIDC	National Snow and Ice Data Center
NVE	Norwegian Water Resources and Energy Directorate
SAF	Satellite Application Facilities
SMMR	Scanning Multichannel Microwave Radiometer
SSM/I	Special Sensor Microwave/Imager
SSMIS	Special Sensor Microwave Imager Sounder
SWE	Snow Water Equivalent

Seznam obrázků, tabulek a grafů

Obrázky

Obrázek č. 1: Elektromagnetické spektrum	11
Obrázek č. 2: Spektrální vlastnosti sněhu a ostatních povrchů	13
Obrázek č. 3: Spektrální křivky sněhu a oblačnosti	14
Obrázek č. 4: Rozmístění Satellite Application Facilities.....	21
Obrázek č. 5: Produkt SN-OBS-4 z 11. 4. 2017	22
Obrázek č. 6: Thiessenovy polygony vytvořené funkcí Create Thiessen Polygon podle umístění stanic měřících vodní hodnotu sněhu	25
Obrázek č. 7: Rozmístění pozemních stanic měřících SWE v Norsku	26
Obrázek č. 8: Ukázka zobrazení dat jasové teploty v softwaru GCOMUserTool.....	28
Obrázek č. 9: Rozdíl jasových teplot na frekvenčních kanálech 18,7 a 36,5 GHz	29
Obrázek č. 10: Vodní hodnota sněhu na území Skandinávie 5. 3. 2016.....	37
Obrázek č. 11: SN-OBS-4 pro oblast Skandinávie 5. 3. 2016	37

Tabulky

Tabulka č. 1: Mikrovlnné frekvence radiometrů SMMR, SSM/I, AMSR-E	12
Tabulka č. 2: Pásmo v oblasti mikrovlnného záření.....	14
Tabulka č. 3: Vodní hodnota sněhu na pozemních stanicích v Norsku	27
Tabulka č. 4: Koeficienty vlastností sněhu pro pozemní stanice v Norsku	29
Tabulka č. 5: Zeměpisné souřadnice pixelů.....	34
Tabulka č. 6: Korelační koeficient obou měření v jednotlivých pixelech.....	35
Tabulka č. 7: Porovnání vodní hodnoty sněhu.....	38

Grafy

Graf č. 1: Porovnání v kontrolním pixelu č. 2.....	34
Graf č. 2: Porovnání v kontrolním pixelu č. 12.....	35

1. Úvod

Monitoring rozsahu sněhové pokrývky a dalších vlastností sněhu, například výšky, vodní hodnoty, konzistence, velikosti sněhového zrna a dalších, je důležitý především v hydrologii, meteorologii, pro studie o vodním cyklu a o globálních změnách (Shi, 2016).

V zimním období bývá v oblasti Eurasie a Severní Ameriky asi 80 % území pokryto sněhem. V lednu je to téměř 46 miliónů km². V některých místech se ale sněhová pokrývka vyskytuje i v létě a pokrývá 3,8 miliónů km² (Robinson a kol., 1993).

Klasický přístup k měření sněhové pokrývky má své výhody i nevýhody. Provádí se na pozemních srážkoměrných stanicích. K výhodám patří především přesnost měření. Hlavní nevýhoda je měření pouze lokálně na stanici. Další nevýhodou je nedostupnost některých míst, například v horách, kde nelze měření provádět. Z tohoto důvodu se přikračuje k distančnímu přístupu – monitoring za pomoci dálkového průzkumu Země. Metoda dálkového průzkumu Země (DPZ) se začala používat ve druhé polovině 20. století, zažila rychlý vývoj, který trvá až do současnosti. Výhodou je mapování velkého území, i špatně přístupného, za krátký časový okamžik. Získáváme informace o stavu celé plochy, tedy nejen bodů, kdy je nutno mezi jednotlivými místy danou veličinu zjistit dalším výpočtem. Můžeme získat i informace okem neviditelné (např. teplotu povrchu Země). Pro zjištění údajů o sněhové pokrývce se metoda DPZ používá prakticky od počátku kvůli jedinečným spektrálním vlastnostem sněhu vůči ostatním povrchům na Zemi.

Vodní hodnota sněhu ukazuje, kolik se nachází ve sněhové pokrývce vody. Znalosti této hodnoty mohou předpovědět jarní povodně, ale mohou sloužit i k hospodářským účelům, kdy údaje o vodní hodnotě sněhu určí následný stav podzemních vod a objem vody v půdě. V České republice se pozemnímu měření vodní hodnoty věnuje Český hydrometeorologický ústav (ČHMÚ). Srážkoměrné a klimatické stanice ČHMÚ měří vodní hodnotu sněhu jednou týdně a to v pondělí v 7:00 hod. a k dispozici dává údaje pro ucelená povodí. Výpočet zásob vody ve sněhu pro povodí provádí vždy od listopadu do dubna a na svých stránkách zveřejňuje údaje vždy v úterý i s aktuální situací a dalším očekávaným vývojem. Zjišťování vodní hodnoty sněhu metodou DPZ se v Evropě věnuje The European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites (EUMETSAT), v Americe pak National Snow and Ice Data Center (NSIDC).

Tato práce se zabývá zjišťováním vodní hodnoty sněhu z dat mikrovlnného radiometru. Cílem práce je získat jasovou teplotu určitého území změřenou radiometrem na dvou frekvencích a z této teploty vypočítat koeficient, který souvisí s daty vodní hodnoty sněhu z pozemních stanic stejného území. Tento koeficient pak bude použit pro výpočet vodní hodnoty sněhu pro celé zvolené území. Výsledkem by měly být tematické mapy pro zkoumané období. Dalším cílem je porovnání dosaženého výsledku s již hotovými mapami, kde je k výpočtu použita jiná metoda.

2. Vodní hodnota sněhu a dálkový průzkum Země

Tato kapitola uvádí do problematiky zjišťování vodní hodnoty sněhu z dat mikrovlnných radiometrů. Jsou zde popsány vlastnosti sněhu, spektrální charakteristiky, a představeno zkoumání vodní hodnoty sněhu pomocí dálkového průzkumu Země. Dále jsou uvedeny metody převádějící naměřenou jasovou teplotu na data o vodní hodnotě, používané ve Finsku a Kanadě, a zmíněny budou i organizace zabývající se touto problematikou.

2.1 Sníh a jeho vlastnosti

Sníh požaduje pro své utvoření specifické podmínky: nízké teploty a vlhkost v atmosféře. Nejběžněji se vyskytuje ve vysokých zeměpisných šířkách a vysokých nadmořských výškách. Na severní polokouli je to především území severní Ameriky, Grónska, severu Evropy a Ruska, na jihu pak oblast Antarktidy (NSDIC, 2017a).

Vzniká přeměnou vodní páry nebo přechlazených kapiček vody v atmosféře při teplotách nižších než 0°C. Zárodky krystalů jsou tvořeny ledovými jádry nebo částicemi prachu. Čerstvě napadaný sníh obsahuje z 3 % ledové krystalky, zbytek tvoří vzduchové mezery. Sněhová pokrývka je většinou tvořena vrstvami různého typu sněhu, které jsou více či méně homogenní. Základní fyzikální vlastnosti jsou hustota, velikost a tvar sněhového zrna, vodní hodnota a teplota.

Sněhovou pokrývku lze rozdělit na několik typů. Jako hlavní rozdělení se u nás uvažuje mezinárodní klasifikace sezónní sněhové pokrývky podle tvaru a vzniku sněhových zrn (Colbeck, 1990 cit. v Novák, 2014).

Sníh se dělí na: nový sníh, který je čerstvě napadaný a vyznačuje se velkou nesoudržností. Dále na zlomkový, neboli plstnatý, který vzniká tím, že na nový sníh začne působit vítr a tlak nadložních vrstev. Okrouhlo-zrnitý sníh je většinou suchý, nemá strukturu ani lesk a má vysokou schopnost spojovat se. Hranato-zrnitý sníh, bývá také označován jako pohyblivý, se začíná vyvíjet z původních zborcených krystalů. Firn je přechodové stádium mezi sněhem a ledem a objevuje se především na jaře. Jako další druhy se uvádí povrchová jinovatka, led a povrchové vrstvy a krusty (Colbeck, 1990 cit. v Novák, 2014; NSIDC, 2017a).

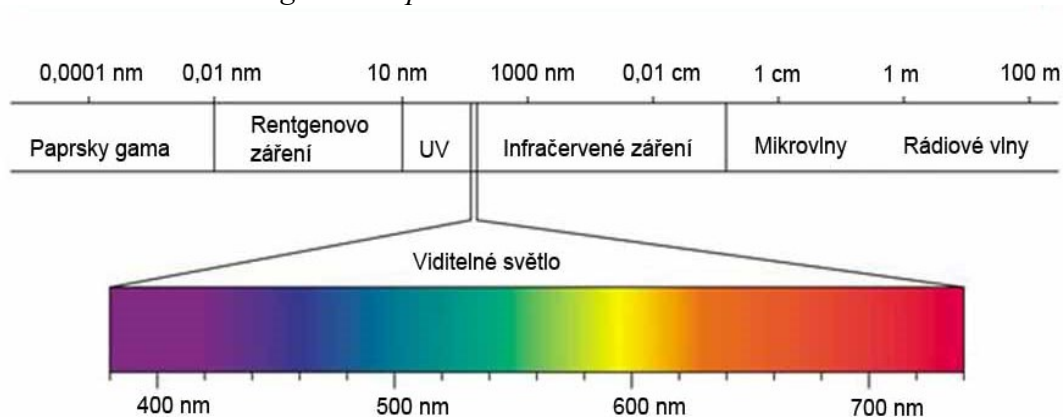
Vodní hodnota sněhu (SWE z anglického Snow Water Equivalent) je definována jako množství akumulované vody ve sněhové pokrývce. „Vyjadřuje množství vody ve sněhové pokrývce obsažené, které si lze představit jako výšku vodního sloupce, jenž vznikne rozpuštěním sněhové pokrývky bez ztrát výparem“ (Durand, 2011 cit. v Špulák a kol., 2012, s. 304). Vodní hodnota se uvádí v milimetrech nebo v jednotkách hmotnosti na metr čtverečný. Měří se staničním srážkoměrem, který odebírá příslušný sloupec sněhu až k povrchu země. Po roztátí sněhu se množství vody změří odměrkou (Špátová, 2010).

Monitoring vodní hodnoty sněhu získává na důležitosti především s nárůstem změn počasí spojeným s klimatickými změnami. Jednotlivé země mají vyvinuté různé techniky a modely měření. Žádná z dostupných technik však není plně spolehlivá a přesná (Špulák a kol., 2012). Proto se poslední dobou hojně využívá metod DPZ.

2.2 Dálkový průzkum Země

Dálkový průzkum Země je založen na informacích elektromagnetického záření tvořeného elektromagnetickými vlnami. Vlna je zvláštním případem elektromagnetického pole, ve kterém se periodicky mění velikost intenzity elektrického a magnetického pole. Počet změn za sekundu vyjadřuje frekvence udávaná v hertzech ($\text{Hz} = \text{s}^{-1}$). Elektromagnetické záření v přírodě je obsaženo ve spojitém spektru (viz Obrázek č. 1), které má rozsah téměř dvaceti řádů (Kolář a kol., 2000).

Obrázek č. 1: Elektromagnetické spektrum



Zdroj: labguide.cz (2017)

V dálkovém průzkumu se využívají především vlnové délky viditelného (V – visible), infračerveného (IR – infrared) a mikrovlnného záření (MW – microwave). Viditelné záření má vlnovou délku mezi 0,38 μm až 0,72 μm . Rozhraní infračerveného záření je rozděleno na tři pásma a blízké IR navazuje z hlediska vlnové délky na viditelné. Mikrovlnné záření zahrnuje oblast vlnových délek větších než 1 mm až do několika metrů (Kolář a kol., 2000).

Pozemní měření sice začala na meteorologických stanicích už před více než sto lety, v polovině 20. století však začaly měřicí stanice využívat i pomoci dat ze satelitů kvůli lepšímu prostorovému a časovému pokrytí. Podle Cliffordové (2010) jsou radiometry s frekvenčními kanály vhodnými k monitorování sněhu v provozu od 60. let 20. století. Nejpoužívanějšími jsou mikrovlnné radiometry, které mohou změřit jak výšku sněhu, tak vodní hodnotu. V počátcích zkoumání dat z mikrovlnných radiometrů byla využívána a interpretována data z Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR). Institucí, spravující tato data, byla National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). Další velkoměřítkový produkt v severní Americe, založený taktéž na datech z AVHRR, vydával Geostationary Observational Environmental Satellite (GOES). Pro přehled radiometrů viz tabulku č. 1.

Tabulka č. 1: Mikrovlnné frekvence radiometrů SMMR, SSM/I, AMSR-E

Instrument	Kanál [GHz]	Polarizace	Funkční doba
SMMR	6.6, 10.7, 18, 21, 37	V, H pro všechny kanály	1978 – 1987
SSM/I	19, 22, 37, 85	V, H pro všechny kanály kromě 22 GHz (pouze V)	1987 – doposud
AMSR-E	6.9, 10.7, 18.7, 23.8, 36.5, 89	V, H pro všechny kanály	2002 - doposud

Zdroj: Clifford (2010)

Pozn.: V – vertikální polarizace, H – horizontální polarizace

Produkty Moderate Resolution Imaging Spectrometer (MODIS) používaly automatický algoritmus detekující sněh ve spolupráci s výsledky z SSM/I a SMMR.

Objekty na zemi nevyzařují jen infračervené záření, ale i mikrovlnné na nízkých energetických úrovních. Mraky v porovnání se sněhem nebo ledem toto záření nevyzařují, proto lze používat i při zvětšené oblačnosti a dále také v noci. Kvůli nízké energetické úrovni se mikrovlnné záření měří pro velká území a detaily, například u mořského ledu, nejsou rozpoznatelné. Tyto senzory však mohou provádět

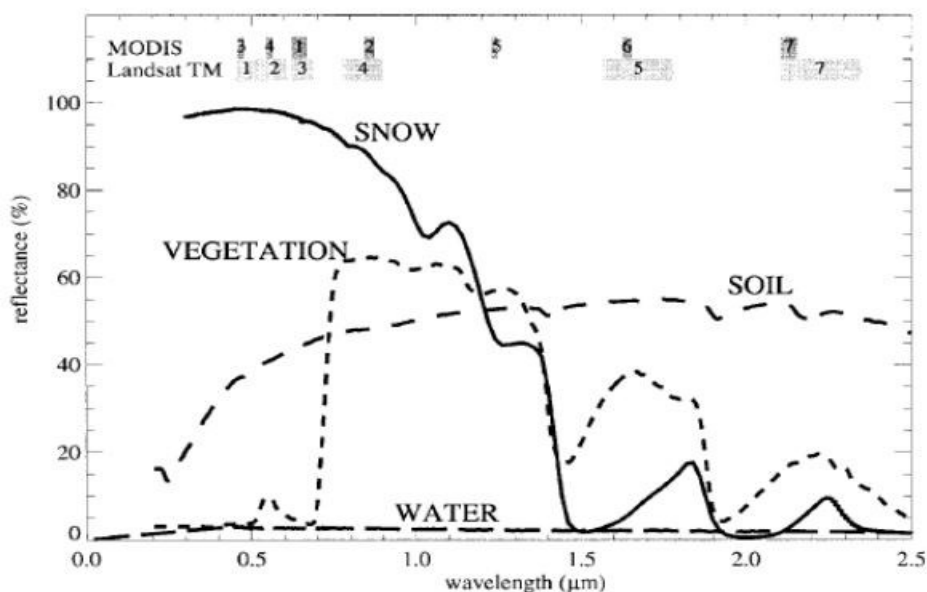
nejkomplexnější a časově nejdelší sledování určitého území. Slouží tak k zaznamenávání změn v oblasti Arktidy nebo Grónska (NSDIC 2017b)

Dálkový průzkum Země používá mikrovlnné spektrum k měření vyzářené radiace nebo intenzity návratu mikrovlnného signálu. Elektrickými vlastnostmi, zahrnujícími dielektrickou konstantu, která představuje míru uspořádání a vytvoření elementárních dipólů v nevodivé látce, jsou především vyzařování v mikrovlnném pásmu a jeho návrat (Foster 1984, cit. v Hall 1985). K popsání všech elektrických vlastností sněhu je potřeba znát všechny dostupné vlastnosti vzduchu, ledu a vody. Nejdůležitějším faktorem ve změně dielektrické konstanty je pak množství vody ve sněhu (Hall 1985).

2.2.1 Spektrální charakteristiky sněhu

Sníh má oproti ostatním objektům na povrchu odlišné spektrální vlastnosti (viz Obrázek č. 2). Nejlépe rozlišitelný je ve středním infračerveném pásmu. Odrazivost sněhu je velmi vysoká ve viditelném a blízkém infračerveném pásmu (Department of Geology 2017). Stejně vysokou odrazivost mají i vrstvy oblaků, jež tvoří ledové krystalky (Kolář a kol. 2000).

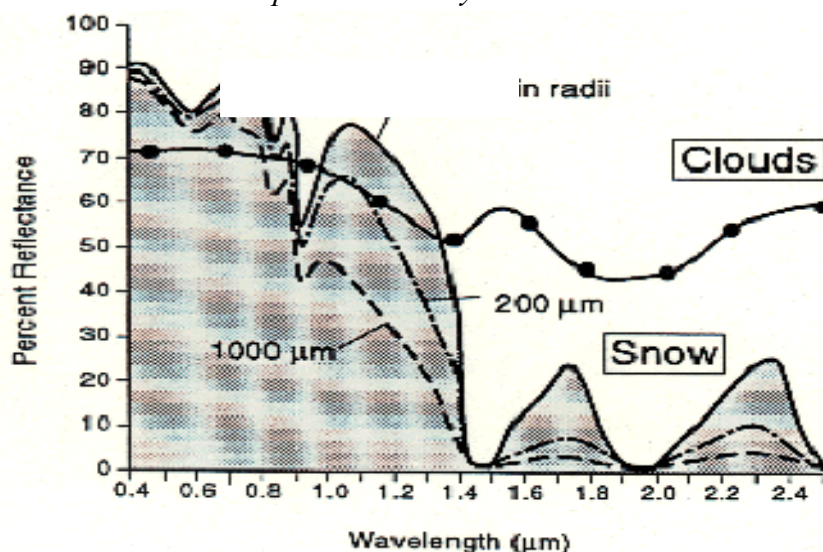
Obrázek č. 2: Spektrální vlastnosti sněhu a ostatních povrchů



Zdroj: pocasi.cz (2017)

Odrazivost sněhu je závislá na sněhových vlastnostech – na velikosti sněhového zrna, obsahu vody, výšce sněhu (Hall, Martinec 1985). Sluneční záření, které je od sněhu odraženo zpět do atmosféry, dosahuje 80 – 90 % (NSDIC 2017a). Čerstvě napadlý sníh má nejvyšší odrazivost ve viditelném pásmu, zatímco s nárůstem obsahu vody odrazivost klesá (Hall, Martinec 1985). Oblačnost však vykazuje podobné spektrální charakteristiky, a proto je odlišení sněhu od oblaků za určitých situací velmi obtížné (viz Obrázek č. 3).

Obrázek č. 3: Spektrální křivky sněhu a oblačnosti



Zdroj: *Spectral Reflectance Characteristics* (2017)

V optické části spektra neexistuje metoda pro určení vodní hodnoty sněhu, jelikož v této oblasti je využíváno odrazivých vlastností objektů. Navíc přístroje využívající viditelnou a infračervenou část spektra mohou být použity jen za jasného počasí. Mikrovlnné záření má schopnost pronikat skrz oblačnost, tmu i skrz povrch objektu a poskytnout tak informace o vnitřní struktuře (Špátová, 2010). Mikrovlnné záření se dělí na další pásma podle vlnové délky a frekvence (viz Tab. č. 2).

Tabulka č. 2: Pásma v oblasti mikrovlnného záření

Pásmo	Vlnová délka (cm)	Frekvence (GHz)
Ka	0,75 - 1,1	40 - 26,5
K	1,1 - 1,67	26,5 - 18
Ku	1,67 - 2,4	18 - 12,5
X	2,4 - 3,75	12,5 - 8
C	3,75 - 7,5	8 - 4

Pásmo	Vlnová délka (cm)	Frekvence (GHz)
S	7,5 - 15	4 - 2
L	15 - 30	2 - 1
P	30 - 100	1 - 0,3

Zdroj: Kolář a kol. (2010)

Mikrovlny prochází objektem beze změn, pokud vlnová délka přesáhne velikost částic. I proto prochází oblačností. (Henderson a Lewis, 1998). Tento princip platí i pro průchod sněhovou pokrývkou. Vyšší frekvence pak reagují i na malé anomálie ve sněhové pokrývce (Dobrovolný, 2004 cit. v Špátová, 2010).

2.2.2 Problematika výpočtu vodní hodnoty sněhu z dat mikrovlnných radiometrů

Obecně se vodní hodnota sněhu zjišťuje odvozením z rozdílu jasových teplot mezi dvěma mikrovlnnými frekvencemi, označovanými jako „spektrální gradient“.

Jasová teplota je měření vyzařovaného mikrovlnného záření směrem k družici z horní vrstvy atmosféry vyjádřená v jednotkách teploty ekvivalentních k černému tělesu (Remote Sensing Systems 2017a). Černé těleso je ideální těleso, které pohlcuje záření všech vlnových délek dopadajících na jeho povrch. Současně je ideálním zářičem – ze všech těles o stejné teplotě vysílá největší množství zářivé energie (Kolář a kol. 2000). Souvislost mezi celkovou intenzitou záření M_ϵ produkovaným černým tělesem a jeho teplotou T vyjadřuje Stefan-Boltzmanův zákon:

$$M_\epsilon = \sigma T^4 \quad (1)$$

kde σ je přírodní konstanta rovna $5,6693 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \text{ K}^{-4}$ (Kolář a kol. 2000). Každá látka je tak zdrojem neustálého elektromagnetického záření.

Jasová teplota (také používána zkratka T_b) je míra vyzařování mikrovlnného záření, které putuje směrem vzhůru z horní části zemské atmosféry. Přeměna ze surových dat na jasovou teplotu horní vrstvy atmosféry se nazývá kalibrační proces. K odvození hodnoty T_b je nutno několik kalibračních kroků. Jasová teplota změřená mikrovlnným radiometrem je považována za základní datový záznam o klimatu a z těchto hodnot bývají dále odvozena měření rychlosti větru, vodního výparu, obsahu vody v oblacích, povrchová teplota a další (Remote Sensing Systems 2017).

Mikrovlnné záření emitované sněhovou pokrývkou obsahuje záření ze dvou zdrojů: z objemu sněhu a z pevného povrchu pod sněhem. Záření je při průchodu ze spodních vrstev rozptylováno na částicích sněhu. Velikost tohoto rozptylu, která závisí na výšce sněhové pokrývky a velikosti ledových krystalků, je základním fyzikálním parametrem metody zjišťování vlastností sněhu dálkovým průzkumem. Z modelu tohoto jevu, založeném na Mieově teorii rozptylu vyplývá, že rozptyl mikrovlnného záření na ledových krystalech ve sněhu bez přítomnosti vody je největší na vlnové délce 0,8 cm (37 GHz) a klesá s rostoucí vlnovou délkou. Rozptyl je dominantní u záření s vlnovou délkou srovnatelnou s velikostí krystalků (< 1 cm). U záření s vlnovou délkou větší než velikost krystalů (> 5 cm), bude mít dominantní účinek absorpce. V závislosti na použité vlnové délce a charakteristické velikosti krystalků ve sněhu se síla vrstvy suchého sněhu, kterou projde mikrovlnné záření, pohybuje zhruba mezi 10 a 100 násobkem vlnové délky. Přítomnost obsahu kapalné vody ve sněhové pokrývce zcela mění spektrální projev sněhu v mikrovlnné oblasti. Již několik procent kapalné vody ve sněhu přispívá výrazně k nárůstu celkové vyzařované energie oproti suchému sněhu.

Do hodnoty vyzařované energie přispívá i záření emitované pevným povrchem. Suchá nebo zmrzlá půda má vysokou emisivitu (0,9 - 0,95), zatímco mokrá půda má emisivitu jen 0,7. Vliv pevného podloží se projeví tím více, čím slabší bude sněhová vrstva.

Vodní hodnota sněhu se počítá z rozdílů jasových teplot. Rozdíl využívá odlišných vlastností těchto dvou frekvencí (Špátová 2010). Základní rovnici lze vyjádřit:

$$SWE = a * (T_{b\ 18,7V} - T_{b\ 36,5V}) \quad (2)$$

kde koeficient a závisí na velikosti sněhového zrna a T_b značí rozdíly jasových teplot na uvedených kanálech (Tedesco, Wang 2006).

Pro každé území je snaha o modifikaci a zpřesnění určitého algoritmu tak, aby byly odchylky při porovnání s pozemními měřeními co nejmenší. Na území Finska byl použit HUT (Helsinki University of Technology) snow emission model (Pulliainen 2006). V Kanadě pak užili tento upravený model pro zájmové území Roy a kol. (2004).

Modely, zabývající se zjišťováním vodní hodnoty sněhu z dat radiometrů a zkoumající rozptyly či odchylky oproti pozemním měřením, dělí Shi (2016) na semi-empirické, které jsou založeny na měřených datech, ale jejich platný rozsah je omezený,

analytické, založené na rovnicích a jejich aproximacích, ale struktura sněhu je zjednodušená, a numerické.

2.2.3 HUT snow emission model a další modely zjišťující vodní hodnotu sněhu z dat mikrovlnných radiometrů

HUT snow emission model je založen na přenosu záření, popisuje pozorování jasové teploty jako funkci charakterizovanou sněhovým „balíčkem“ a s ohledem na účinky atmosféry, vegetace a typu krajinného pokryvu. Kompletní popis fungování tohoto modelu uvádí Pulliainen a kol. (1999). Vyzařování sněhového „balíčku“ je modelováno a pomocí Delta-Eddingtonovy aproximace na radiační přenos rovnic (s ohledem na velikost přímého rozptylu braného jako empirický koeficient).

Vstupní parametry HUT uvažují vlastnosti sněhu (výška, hustota, velikost sněhového zrna a teplota), vlastnosti půdy (teplota, dielektrická konstanta a výšková proměnlivost), charakteristiky lesního porostu a teplota v blízkosti povrchu závislá na vyzařování atmosféry a propustnosti. Formulace modelu a jeho modifikace popisuje detailně Pulliainen a Hallikainen (2001). Pro severní Eurasii se používají předdefinované hodnoty průměrné velikosti sněhového zrna, její rozptyl, tloušťka sněhové pokrývky, průměrná teplota a půdní dielektrická konstanta (HSAF 2010).

Po porovnání jasové teploty na kanálech blízkých 19 GHz a 37 GHz následují tři fáze algoritmu. V první fázi je odhadnuta skutečná velikost sněhového zrna na referenčních stanicích, pro které je měřena výška sněhu. Odhad velikosti sněhového zrna je počítán z rozdílů modelových jasových teplot změřených radiometrem. V této fázi se taktéž zjišťuje směrodatná odchylka měření závislá na počtu referenčních stanic.

Ve druhé fázi dochází k odhadu výšky sněhu a vodní hodnoty sněhu a také směrodatné odchylky pro vyšetřovanou lokalitu. Pro přehled měřicích stanic je použita interpolační metoda Kriging. Ve třetí fázi je pak odhadována vodní hodnota sněhu pro konkrétní lokality v určitém čase porovnáním dvou datových zdrojů a jejich odchylek.

Tento model se liší v hornatých a nížinných regionech. Pro spočtení konečné vodní hodnoty v každém pixelu se hledá vztah mezi velikostí sněhového zrna, výškou sněhu a rozdílem jasové teploty na vertikálně polarizovaných kanálech 18.7 a 36.5 GHz. HUT model je vhodný pro vypočítání SWE, pokud výška sněhu je 0,05 m až 1,00 m. Je užíván po 0,05 m intervalech k minimalizování odchylek (HSAF 2010).

HUT snow emission model se snažili použít i na zjištění vodní hodnoty sněhu v oblasti Kanady. Vzhledem k tomu, že tento model uvažuje některé předdefinované odhadnuté hodnoty, jako například velikost sněhového zrna nebo průměrnou teplotu sněhu a půdy pro zájmové území ve Finsku, musel Roy a kol. (2004) přikročit k úpravě tohoto modelu pro území v Kanadě, aby bylo eliminováno co nejvíce chyb. Byl proto vytvořen nový koeficient zániku sněhu s jinými předdefinovanými hodnotami odhadnutými z měření v únoru 1994. Díky tomu tak bylo dosaženo většího zpřesnění při předpovídání vodní hodnoty sněhu s průměrnou odchylkou 10 mm oproti původnímu HUT modelu (Roy a kol. 2004).

Odhadováním vodní hodnoty sněhu z dat dálkového průzkumu a porovnáním s pozemními stanicemi v oblasti povodí řeky Mackenzie v Kanadě se zabývali Tong a Velicogna (2010). Střední chyba se pohybovala od 12 mm na počátku zimy po 50 mm v pozdní zimní sezóně. Celková přesnost map sněhové pokrývky z instrumentu AMSR-E, který byl použit, se pohybovala mezi 91 a 94 % v dílčích povodích řeky Mackenzie (Tong, Velicogna 2010).

Všechny výše uvedené modely jsou velmi složité a vyžadují stanovení velikosti sněhového zrna a dalších parametrů. I přesto ale nejsou dokonale přesné, protože řada vstupních parametrů je odhadována nebo vypočítána z dlouhodobých průměrů.

2.2.4 Radiometry používané ke zjišťování vodní hodnoty sněhu

Základním radiometrem, který zjišťuje vodní hodnotu sněhu pomocí porovnání jasových teplot na dvou spektrálních kanálech, je Advanced Microwave Scanning Radiometer – Earth Observing System (AMSR-E) na družici Aqua. Vzhledem k tomu, že tento radiometr je od října 2012 nefunkční, EUMETSAT používá pro tvorbu svých produktů (zejména produktu SN-OBS-13) data z radiometru The Special Sensor Microwave Imager (SSM/I), který má však horší rozlišení (asi 25 km/pixel). Japonská vesmírná agentura (JAXA) pak užívá pro tvorbu svých produktů satelit GCOM-W1 a radiometr AMSR2.

2.2.4.1 Radiometr AMSR-E na satelitu Aqua

Latinské slovo pro vodu – Aqua – je pojmenováním mise a satelitu, který sbírá data o vodním cyklu na Zemi. Tato data zahrnují údaje o evaporaci z oceánů, obsahu vody v atmosféře, oblačnosti, výparu, mořském a pevninském ledu a o sněhové

pokrývce. Aqua je součástí NASA, byla vypuštěna 4. 5. 2002 a na palubě se nachází šest instrumentů, které provádí měření a sbírají data. Tento satelit byl prvním členem dráhy Afternoon Constellation (A-Train) ve výšce kolem 700 km nad Zemí (více viz kapitola 2.2.4.3.).

AMSR-E snímá na dvanácti kanálech po šesti frekvencích. Měří horizontálně i vertikálně polarizovanou jasovou teplotu na frekvencích 6.9, 10.7, 18.7, 23.8, 36.5 a 89.0 GHz. Prostorové rozlišení se pohybuje od 5,4 km na frekvenci 89 GHz po 56 km na 6.9 GHz.

2.2.4.2 SSM/I a SSMIS mise na satelitu DMSP

The Special Sencor Microwave Imager (SSM/I) a the Special Sensor Microwave Imager Sounder (SSMIS) jsou pasivní radiometry, které v současnosti užívá EUMETSAT pro zjišťování údajů o vodní hodnotě sněhu. Radiometry jsou nesený na palubě DMSP (Defence Meteorological Satellite Program) od roku 1987. Instrumenty jsou číslovány podle toho, na kterém satelitu se nachází, v současnosti jsou v provozu instrumenty F15, F16, F17 a F18. K získání dat z těchto radiometrů slouží algoritmus založený na 20letém zlepšování a modifikacích (Remote Sensing Systems 2017b).

SSM/I váží 96 kg a je 21 frekvenční s 24 kanály. Některé jsou polarizované jen vertikálně nebo jen horizontálně. Kanály 19.35 a 37.0 GHz, užívané EUMETSATEm mají jak vertikální tak horizontální polarizaci (HSAF 2012).

2.2.4.3 Údaje o radiometru AMSR2 na satelitu GCOM-W1

Japonský satelit byl vypuštěn z města Tanegashima na raketě H-2A 17. 5. 2012 v 16:39. Satelit JAXA (Japan Aerospace Exploration Agency), přezdívaný Shizuku, váží téměř 2 tuny. Je to první satelit ze série GCOM-W (Global Change Observation Mission Water) měřící cirkulační systémy na Zemi a v atmosféře. Zabývá se měřením srážek, oblačnosti, obsahu vody v atmosféře, teploty mořské vody, tloušťky mořského ledu, sněhové pokrývky a půdní vlhkosti. Na družici se nachází AMSR2, instrument pro měření slabého mikrovlnného záření vycházejícího z povrchu Země a atmosféry. Předpokládaná doba, kdy by měl být radiometr schopný provádět měření, je nejméně 5 let (NASA 2012). Tento radiometr nahradil AMSR – E, který je od října 2012 mimo provoz.

Oběžná dráha satelitu je stejná jako například u satelitu Aqua, na kterém je již zmíněný AMSR - E. Jedná se o tzv. „A - Train“ (The Afternoon Constellation). Jde o soubor satelitů obíhajících kolem Země ve výšce kolem 700 kilometrů. Tyto satelity

protínají rovník každý den přibližně v 13:30 (JAXA 2016). Dalšími členy této konstelace jsou satelity Aura (zabývá se studováním chemických změn v atmosféře), Parosol, jehož mise skončila v roce 2013 a zabývala se charakteristikou radiačních vlastností oblaků a aerosolů (CNES 2017), CloudSat a CALIPSO zabývající se oblačností, šestým členem A-Train se pak stal GCOM-W1 v roce 2012 a jako poslední přibyl OCO-2 (Orbiting Carbon Observatory-2), zabývající se monitorováním CO₂ (NASA 2017).

GCOM-W1 se nachází ve výšce 699,6 km nad rovníkem, dráha je synchronní se Sluncem, to znamená, že při stoupající fázi, kdy satelit směřuje od jižního pólu k severnímu, probíhá pozorování denní scény, při klesající fázi směrem od severního pólu k jižnímu je pozorování noční scény. Úhel mezi Sluncem a satelitem je tak vždy nad tím samým místem stejný. Stoupající fáze protíná rovník v čase 13:30 středního slunečního času. Satelit zopakuje svou originální dráhu po 16 denním intervalu, zatímco oblétně Zemi 233krát, to je asi 15krát denně (JAXA 2016).

AMSR2 senzor rotuje proti směru hodinových ručiček kolem osy Z, zatímco vytváří kuželovitý obraz, kde paprsek vysílače opisuje oblouk přibližně o průměru 1 660 km na zemském povrchu. V každém obraze je určitý počet měřených bodů.

AMSR2 měří na frekvenčních kanálech 6.9, 7.3, 10.7, 18.7, 23.8, 36.5 a 89.0 GHz. Vertikální a horizontální polarizace probíhá ve všech kanálech.

2.3 Instituce

V Evropě se mapováním sněhu za použití dálkového průzkumu Země zabývá EUMETSAT. Globální agentura provozující satelity byla založena v roce 1986. Jejím posláním je poskytovat satelitní data o počasí a klimatu, 24 hodin denně, 365 dní v roce, ve spolupráci s národními meteorologickými institucemi.

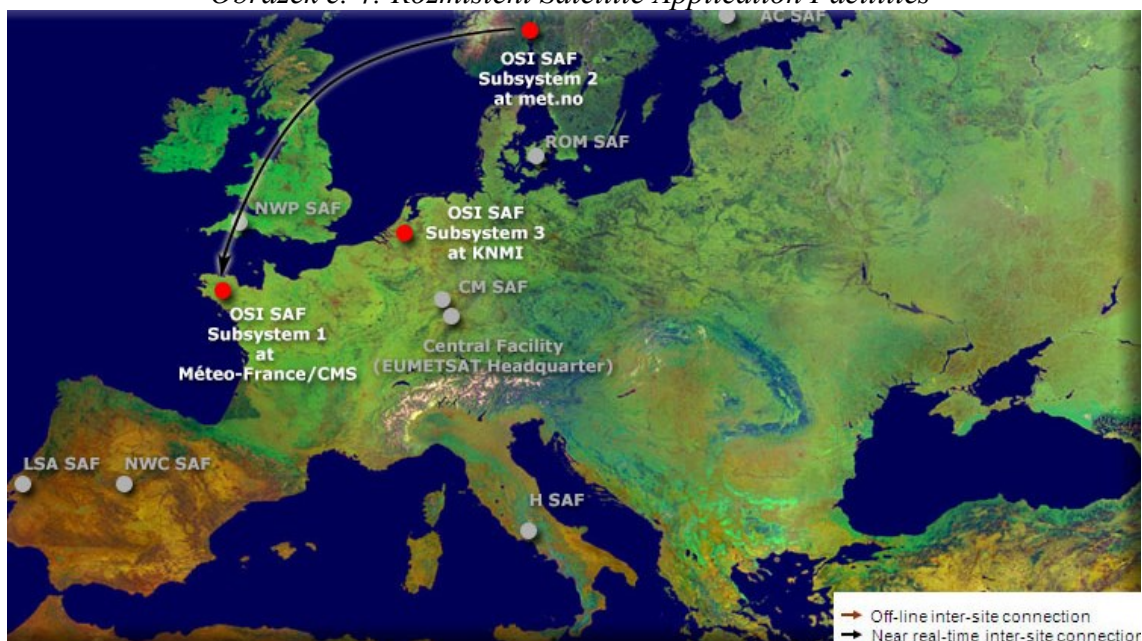
Jejich geostacionární družice létají 36 000 km nad povrchem Země ve stejné rychlosti, jako je rychlost zemské rotace. To umožňuje pořizovat nové snímky v řádu několika minut. Mezi tyto družice můžeme řadit například Meteosat-9, -10 a -11. Družice létající na polární dráze ve výšce 817 km, se nazývají Metop a provádí detailnější pozorování zemské atmosféry, oceánů a kontinentů.

Pro vyhodnocování výsledků změřených družicemi je zapotřebí také pozemní segment EUMETSATu. Kontrolní centrum MCC (Mission Control Centre) má hlavní

sídlo ve městě Darmstadt v Německu. Dále se dělí na několik poboček rozmístěných téměř po celé Evropě. Každá pobočka má svou specializaci. Starají se o kontrolu vesmírného prostoru, ale i o procesy zpracování a distribuci dat (EUMETSAT 2017a).

Poskytují jak surová přímo naměřená data bez jakýchkoliv korekcí (nazývají se data Level 0 nebo Level 1) a dále pak upravená data podle konkrétního zaměření. Tímto se zabývá dalších 8 stanic, tzv. Satellite Application Facilities (SAF) (viz Obrázek č. 4), z nichž každá vyvíjí svůj vlastní software se specializací na konkrétní oblast výzkumu.

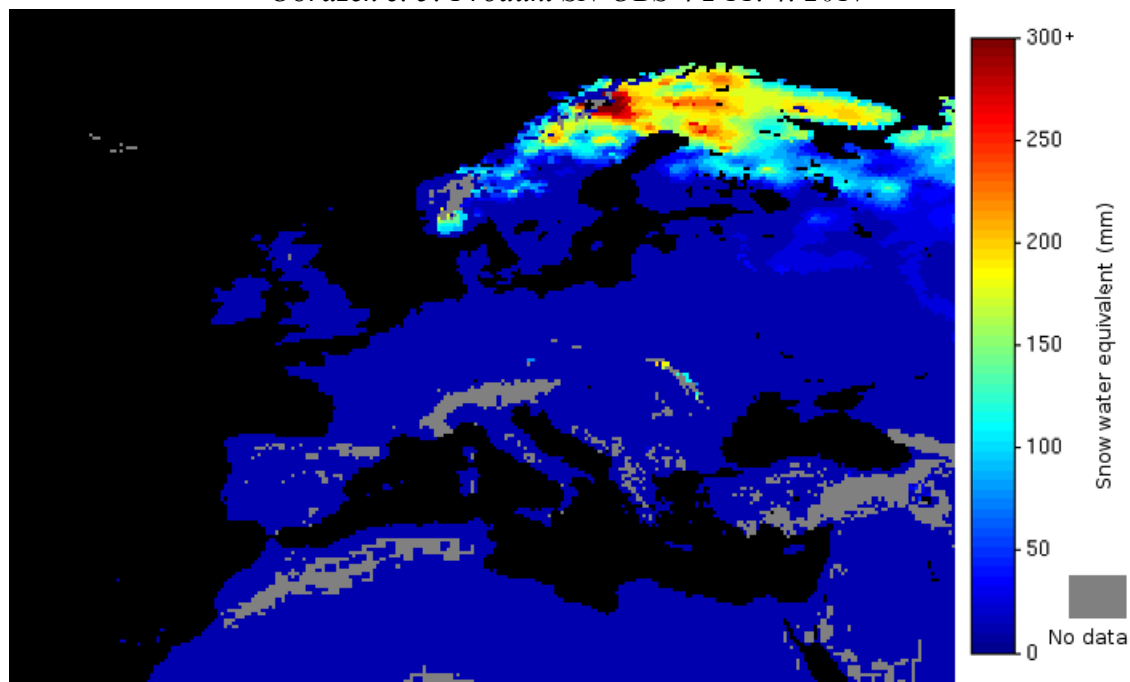
Obrázek č. 4: Rozmístění Satellite Application Facilities



Zdroj: EUMETSAT (2017b)

Konkrétně o operace v hydrologii a vodní management se stará H – SAF v Itálii. Tato pobočka byla založena v září 2005. Hlavní náplní je poskytovat aktuální produkty ze satelitů především v oblasti srážek, vlhkosti půdy a sněhových parametrů (rozšíření sněhové pokrývky, tání a vodní hodnota sněhu). Další oblastí je provádění ověření užitečnosti nových produktů v boji proti záplavám, sesuvům půdy, lavinám a posuzování vodních zdrojů. Jejich produkt SN-OBS-4 se týká právě vodní hodnoty sněhu. Při tvorbě této mapy je použit HUT model, který je popsán výše. Na výsledku (viz Obrázek č. 5) spolupracují meteorologická pracoviště ve Finsku a v Turecku. Finský meteorologický ústav zpracovává data z plochých oblastí, turecký potom z hornatých území. V současnosti využívají radiometry SSM/I a SSMIS kvůli nefunkčnosti radiometru AMSR-E na družici Aqua, který používali původně (HSAF 2017a).

Obrázek č. 5: Produkt SN-OBS-4 z 11. 4. 2017



Zdroj: HSAF (2017b)

Další institucí, která vydává produkty o vodní hodnotě sněhu, je NSDIC spadající pod NASA. Tento ústav byl založen v roce 1976 nejprve jako archiv a informační centrum pro glaciologii. Později se oblast působení rozšířila i na celou kryosféru a sněhovou pokrývku. Distribuuje data denní, týdenní a měsíční na různých úrovních zpracování, od dat surových až po kompletně vytvořené produkty. Pro vodní hodnotu sněhu jsou dostupná archivní data do roku 2011 z radiometru AMSR-E (NSDIC 2017c).

3. Data a metodika

Tato kapitola se věnuje popisu dat, která byla použita v této práci, jejich získání a formátu. Dále je zde uvedena metodika jednotlivých kroků praktické části práce.

3.1 Data

Pro tuto práci byla využita data z družice GCOM-W1, jejíž parametry jsou popsány výše. K měření mikrovlnného záření se užívá instrument AMSR2. Původně měl být využit radiometr AMSR-E na družici Aqua, po zjištění skutečnosti, že od jisté doby je pouze pasivní, bylo přikročeno k hledání náhradního řešení. Tím se stal právě radiometr AMSR2. Snímky z tohoto radiometru poskytuje zdarma ke stažení JAXA. Nejsou k dispozici přímo surová data (Level 1A), ale už přímo přepočítaná naměřená data na jasovou teplotu (Level 1B). Po zaregistrování jsou uživateli zaslána data vybraného území v požadovaném období. Lze volit i mezi formáty rastrů. V nabídce je klasický geoTIFF, dále formát NetCDF a HDF5, který je základní. Rastr obsahuje všechny kanály, které radiometr měří, ve vertikální i horizontální polarizaci. Data je možno zobrazit ve speciálním softwaru, který poskytuje přímo JAXA. Jedná se o Shortcut to GCOM User Tool. V tomto softwaru lze data zobrazit, ale nedají se s nimi dělat žádné operace. Je však možno vyexportovat je v jiném formátu.

Oblast Norska byla zvolena z několika důvodů. Jednak se na tomto území vyskytuje v zimním období sníh, dále bylo potřeba znát vodní hodnotu sněhu z pozemních stanic, která byla získána přes Norwegian Water Resources and Energy Directorate (NVE), konkrétně na jejich internetových stránkách, které zobrazují denní mapy sněhu, počasí a vodních podmínek v Norsku.

NVE zobrazuje ve svých mapách celkem 24 pozemních stanic měřících vodní hodnotu sněhu. Tyto stanice nejsou příliš rovnoměrně rozmístěny po celém území, navíc u některých z nich nebyla dostupná konkrétní bodová data přímo z měření na stanici, nýbrž jen data interpolovaná z ostatních stanic. Údaje z pozemních stanic sloužily především ke zjištění koeficientu, díky kterému potom byla vypočítána vodní hodnota sněhu na celém území.

Pro porovnání vypočtené vodní hodnoty sněhu s metodou HUT snow emission model na území Evropy byl získán produkt SN-OBS-4 od EUMETSATu.

3.2 Metodika

V práci byly použity statistické i kartografické a matematické metody pro zpracování praktické části.

Nejprve byly zvoleny dny v období zimy 2015/2016. Aby bylo vidět, jak se vodní hodnota sněhu chová během celého zimního období, bylo zvoleno devět různých dní od prosince do dubna. Tyto dny byly zvoleny tak, aby se v žádném dni nevyskytovaly na třech čtvrtinách území Norska stejné podmínky. K tomu posloužily mapy od NVE a met.no, které zobrazují interpolované hodnoty výšky sněhu. Dny byly zvoleny následující: 6. prosince 2015, kdy se nacházela sněhová pokrývka na většině norského území, 25. prosince 2015, kdy se oteplilo, některý sníh roztál a v oblastech s vyšším výskytem sněhu se zvýšila vodní hodnota, 10. ledna 2016, 27. ledna 2016, 7. února 2016, 20. února 2016, kdy napadlo značné množství sněhu, 13. a 27. března a jako poslední 4. dubna 2016. Rok 2015/2016 byl zvolen z důvodu poměrně dobré zimy v Norsku a kvůli dostupnosti dat pro toto období.

Z map byly vyčteny hodnoty SWE na konkrétních stanicích. Dále byly taktéž odečteny informace o teplotě, výšce sněhu a výšce čerstvého sněhu v konkrétní datum vše z map NVE. Tyto mapy jsou dostupné na webové stránce <http://www.senorge.no/>.

Jak už bylo řečeno výše, pro zjištění vodní hodnoty sněhu bylo potřeba získat koeficient, který byl pak použit na všechny pixely v oblasti vlivu dané stanice. Podle vzorce:

$$SWE = a * (T_{b\ 18,7V} - T_{b\ 36,5V}) \quad (3)$$

kdy jsme znali hodnoty SWE v konkrétním bodě a hodnoty $T_{b\ 18,7V} - T_{b\ 36,5V}$ v pixelu o rozlišení přibližně $0,1^\circ$, který obsahoval ten určitý bod, a jeho následné úpravy do tvaru:

$$a = SWE / \Delta T_b \quad (4)$$

Takto vypočtený koeficient pro každou stanici ve všechny zkoumané dny byl pak použit v další práci s daty. Musely však být vyřazeny takové hodnoty, kdy výška sněhu byla menší než 5 cm, nebo naopak vyšší než 1 m, protože pak vycházel záporný koeficient z důvodu zkreslení radiometrického měření. Tyto krajní hodnoty byly inspirovány HUT snow emission modelem, kde jsou takto stanoveny.

Pomocí softwaru ArcMap 10.2 byla nahrána data, která předtím byla vyexportována z GCOM User Tool ve formátu CSV. Tato data byla převedena do textového editoru a pak pomocí funkce Ascii 3D to Feature Class nahrána do ArcMapu. Vznikla bodová vrstva, ze které byl pak utvořen rastr funkcí Point to Raster. Tento postup je nutno udělat pro oba spektrální kanály. Raster Calculator dále posloužil k odečtení jednotlivých pixelů. Takto vznikl další rastr s hodnotami ΔT_b . K těmto hodnotám bylo třeba přiřadit konkrétní koeficient a , podle vlivu pozemní stanice měřící SWE. Vliv stanic byl zjištěn funkcí Create Thiessen Polygon. Thiessenovy polygony je interpolační metoda, kdy se bodová hodnota převede na polygony, přičemž celý polygon reprezentuje tu hodnotu, která se vztahuje k bodu. Ukázka Thiessenových polygonů pro území Norska a 24 měřících stanic je na Obrázku č. 6.

Obrázek č. 6: Thiessenovy polygony vytvořené funkcí Create Thiessen Polygon podle umístění stanic měřících vodní hodnotu sněhu



Zdroj: EEA (2017), vlastní zpracování

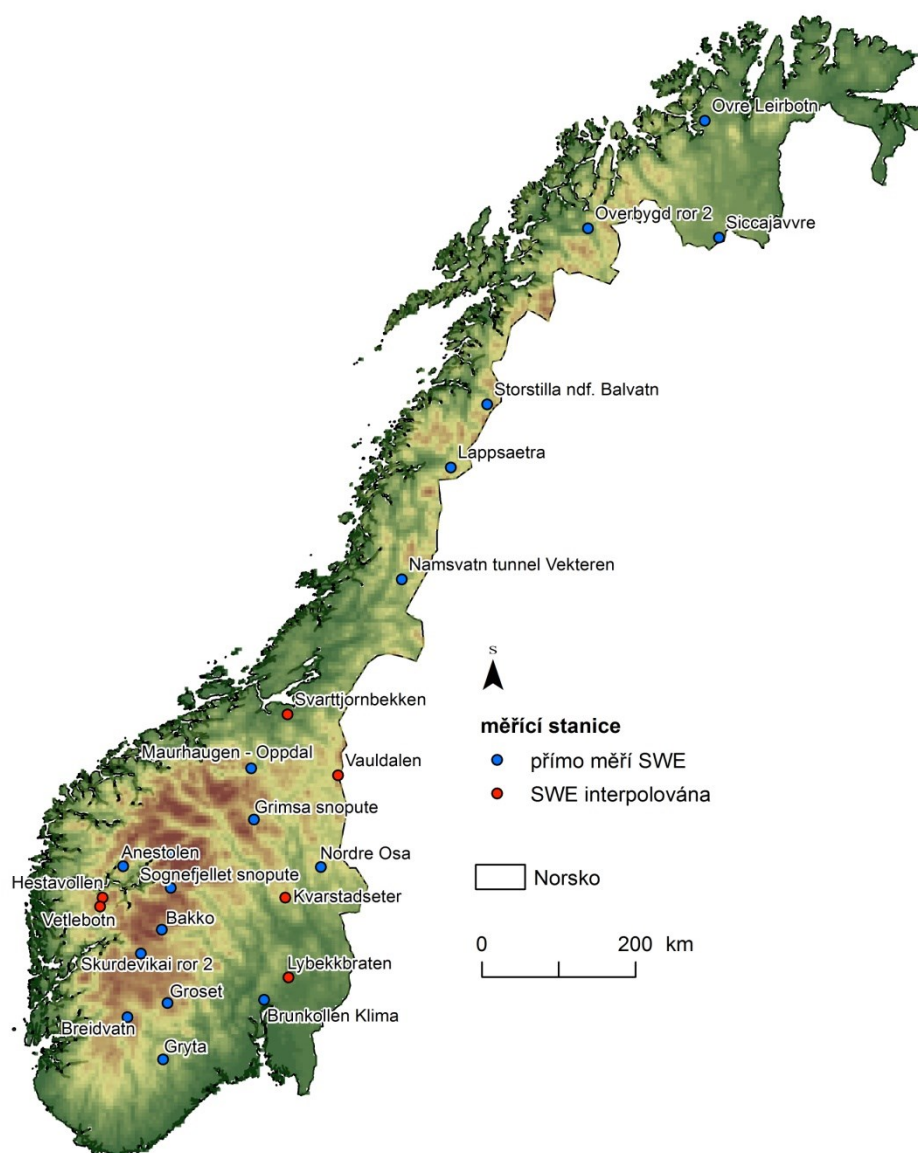
Pro zjištění, které pixely rastru přesně náleží do daného polygonu, byla použita funkce Select by Location. Pro každou stanicí byly vybrány jí náležící pixely a jejich hodnota vynásobena koeficientem a . Tím vznikla hodnota SWE. Tyto kroky se musely provádět s body, proto po provedení násobení koeficientem byla opět použita funkce Point to Raster, s velikostí jednoho pixelu 0,1 bodu. Při tvorbě map nebyl uvažován tvar, sklonitost reliéfu, nadmořská výška, vliv vegetace, ani zastaveného území.

Výsledné mapy pak byly ještě porovnány s mapami od NVE a EUMETSATU.

4. Zpracování dat a výsledky

Pro zjištění vodní hodnoty sněhu na celém území Norska za použití mikrovlnného radiometru bylo potřeba nejprve odečíst SWE na konkrétních stanicích. Rozmístění těchto stanic znázorňuje Obrázek č. 7.

Obrázek č. 7: Rozmístění pozemních stanic měřících SWE v Norsku



Zdroj: EEA (2017), seNorge (2017), vlastní zpracování

Z map, které dává k dispozici NVE ve spolupráci s Norským meteorologickým ústavem a Kartverket.no, byly vyčteny konkrétní hodnoty SWE pro každou stanici a datum, který byl zvolen pro zpracování. Údaje o vodní hodnotě pro všech 24 stanic jsou uvedeny v Tabulce č. 3.

Tabulka č. 3: Vodní hodnota sněhu na pozemních stanicích v Norsku

stanice	6. 12.	25. 12.	10. 1.	27. 1.	7. 2.	20. 2.	13. 3.	27. 3.	4. 4.
Øvre Leirbotn	0,01	0,11	0,15	0,19	0,20	0,26	0,26	*0,29	0,32
Siccejavvre	0,11	0,13	0,13	0,14	0,17	0,19	0,21	0,21	0,20
Øverbygd rør 2	0,03	0,08	0,08	0,11	0,13	0,15	0,14	0,22	0,13
Storstilla ndf. Balvatn	0,07	0,135	0,14	0,18	0,20	0,22	0,22	0,24	0,21
Lappsætra	0,14	0,24	*0,23	*0,21	*0,22	*0,23	*0,23	*0,25	*0,26
Namsvatn t. Vekteren	0,14	0,31	0,25	0,3	*0,32	*0,35	*0,34	*0,42	0,42
Svartt. ¹⁾	0,01	0,03	0,004	0,04	0,06	0,06	0,14	0,05	0,002
Maurhaugen - Oppdal	0,02	0,03	0,05	0,06	0,08	0,08	0,10	0,10	0,08
Vauldalen	0,04	0,07	0,08	0,10	0,13	0,13	0,18	0,20	0,21
Grimsa snøpute	0,01	0	0,03	0,11	0,05	0,06	0,08	0,07	0,08
Nordre Osa	0,03	0,02	0,03	0,05	0,08	0,10	0,12	0,06	0,02
Kvarstadseter	0,05	0,04	0,08	0,10	0,13	0,16	0,19	0,13	0,14
Lybekkbråten	0	0	0,03	0,03	0,01	0,01	0,04	0	0
Brunkollen Klima	0	0	0,05	0,08	0,10	0,12	0,17	0	0
Grytå	0,01	0,01	0,08	0,08	0,16	0,18	0,25	0,24	0,22
Breidvatn	0,16	0,22	*0,21	*0,22	*0,29	*0,27	*0,30	*0,40	*0,39
Groset	0,03	0,05	0,09	0,11	0,19	0,22	0,26	0,28	0,34
Skurdevikåi	0,20	*0,39	*0,33	*0,24	*0,30	*0,30	*0,27	*0,31	*0,31
Bakko	0,10	0,19	0,22	0,25	0,32	0,31	0,33	0,28	0,27
Kyrkjestølane	0,13	0,19	0,21	0,23	0,27	0,28	0,31	0,31	0,32
Sognefjellet snøpute	0,23	0,32	0,23	0,49	*0,37	*0,50	*0,52	*0,62	*0,60
Anestølen	0,20	0,19	0,16	0,23	*0,25	*0,32	*0,27	*0,31	*0,25
Hestavollen	*0,29	*0,35	*0,40	*0,39	*0,42	*0,38	*0,40	*0,44	*0,43
Vetlebotn	*0,32	*0,37	*0,39	*0,38	*0,35	*0,37	*0,38	*0,43	*0,43

Zdroj: seNorge (2017)

Pozn: údaje jsou uvedeny v metrech; * = vodní hodnota sněhu je přepočtena na výšku sněhu 1 m

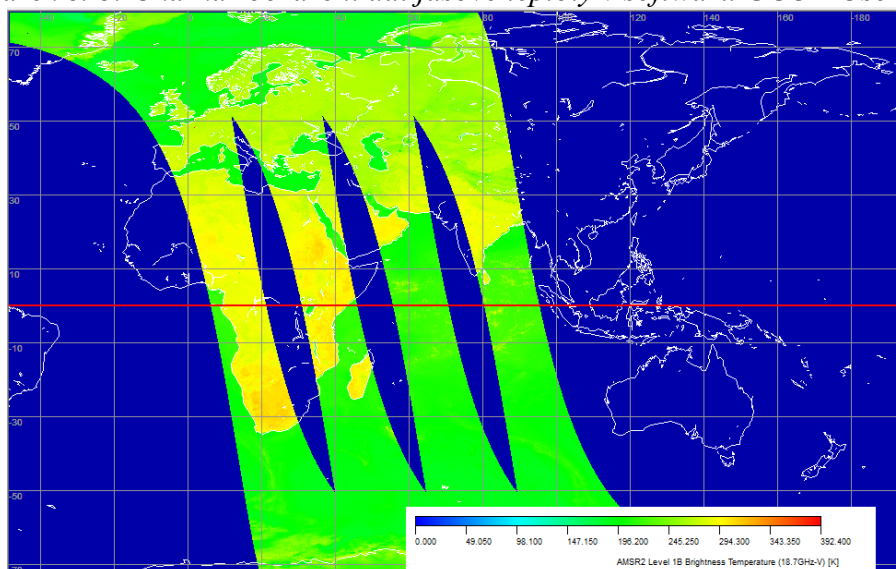
¹⁾Svarttjornbekken

Z tabulky je patrné, že stanice jsou rozmístěny v různých oblastech, ať už takových, kde je sněhu po celou zimu dostatek, nebo naopak žádný. Vodní hodnota sněhu závisí na zeměpisné poloze i nadmořské výšce. V místech, kde byla naměřena výše sněhové pokrývky větší než 1 m, bylo přikročeno ke korekci, protože pro

zkoumání vodní hodnoty sněhu mikrovlnným radiometrem je potřeba, aby výška sněhu byla 5 cm – 1 m (HSAF, 2012). Tato korekce byla provedena vydělením vodní hodnoty sněhu pro celou výšku sněhu původní výškou sněhu.

Dalším krokem, který vedl k zjištění koeficientu potřebného pro výpočet SWE, bylo odečtení jasové teploty mezi dvěma frekvenčními kanály. V tomto případě se jednalo o 18,7 V a 36,5 V. Tyto rastry byly nejprve zobrazeny v programu poskytovaném přímo JAXA - Shortcut to GCOMUserTool. Tento jednoduchý software umožňuje zobrazit data v HDF5 formátu na všech kanálech i polarizacích, které má radiometr k dispozici. Po zobrazení rastru (viz Obrázek č. 8) je možno vybrat území, se kterým dále chceme pracovat a to vyexportovat do jiného formátu, se kterým následně půjde pracovat. V tomto případě se jedná o výběr území Norska, export do CSV a následné zobrazení v softwaru ArcMap 10.2.

Obrázek č. 8: Ukázka zobrazení dat jasové teploty v softwaru GCOMUserTool

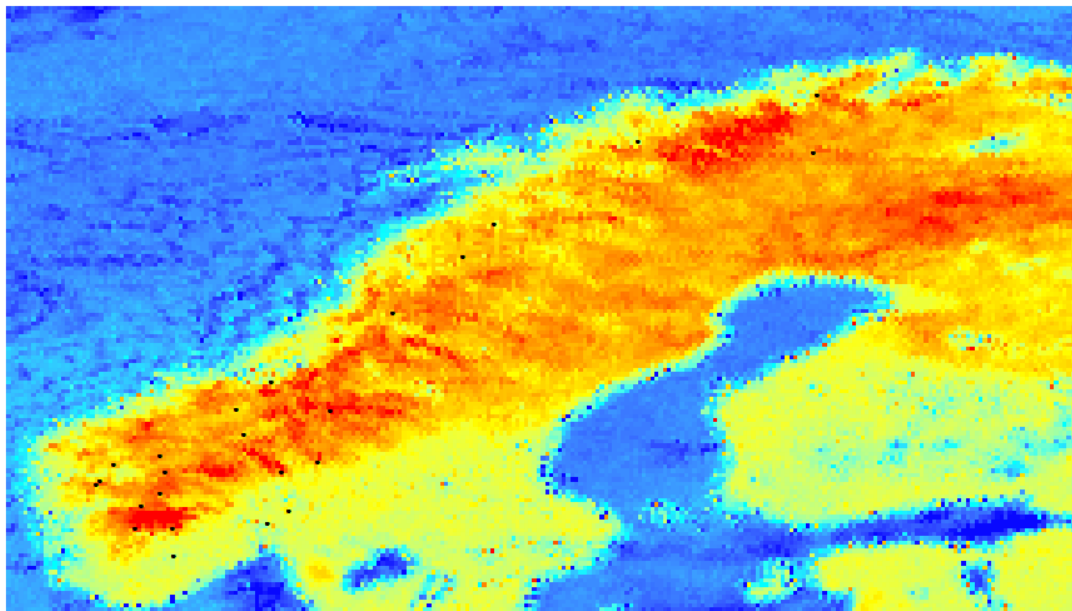


Zdroj: GCOM-W1 (2017)

Software vyexportuje hodnoty jasové teploty se zeměpisnými souřadnicemi. Souřadnicový systém je WGS 84, světový geodetický systém a referenční systém pro GPS (Global Positioning Systém). Hodnoty jsou po 0,1°. Tyto body byly načteny v ArcMapu funkcí Ascii 3D to Feature Class, kdy byly použity souřadnice x a y pro každý bod a jako hodnota z byla uvažována jasová teplota. Pro každou polarizaci tak vznikla síť bodů. Pro lepší práci s hodnotami jasové teploty byly body převedeny na rastr funkcí Point to Raster. Velikost buňky byla zvolena 0,1 bodu. Rastr jasové teploty

na kanálu 18,7 GHz byl odečten od druhého rastru z kanálu 36,5 GHz. Vznikl tak nový rastr rozdílu jasových teplot na dvou frekvenčních kanálech (viz Obrázek č. 9).

Obrázek č. 9: Rozdíl jasových teplot na frekvenčních kanálech 18,7 a 36,5 GHz



Zdroj: GCOM-W1 (2017), vlastní zpracování

Z takto připraveného rastru byla odečtena jasová teplota opět pro známé pozemní stanice. Tím mohl být vypočítán koeficient a podle rovnice 4 uvedené v metodice. Tento koeficient byl vypočítán pro všechny stanice a zkoumané dny. Jednotlivé koeficienty jsou uvedeny v Tabulce č. 4. Měly by zahrnovat další vlastnosti sněhu, které mají vliv na vodní hodnotu, například velikost a tvar sněhového zrna.

Tabulka č. 4: Koeficienty vlastnosti sněhu pro pozemní stanice v Norsku

stanice	6. 12.	25. 12.	10. 1.	27. 1.	7. 2.	20. 2.	13. 3.	27. 3.	4. 4.
Øvre Leirbotn	0,0014	0,0258	0,0154	0,0435	0,0189	0,0235	0,0255	0,1086	0,0281
Siccejavvre	0,0140	0,0072	0,0047	0,0040	0,0048	0,0062	0,0072	0,0077	0,0092
Øverbygd	0,0171	0,0047	0,0070	0,0114	0,0120	0,0149	0,0169	0,0587	0,0205
Storstilla ndf. Balvatn	0,0156	0,0071	0,0068	0,0118	0,0168	0,0182	0,0564	0,0199	0,0365
Lappaetra	0,0189	0,0107	0,0085	0,0128	0,0173	0,0143	0,0247	0,0193	0,5883
Namsvatn t. Vekteren	0,0197	0,1051	0,0092	0,0312	0,0519	0,0400	0,1023	0,2551	0,5385
Svartt. ¹⁾	0,0017	0,0011	0,0023	0,0366	0,0305	0,0052	0,0354	0,6857	0,0021
Maurhaugen - Oppdal	0,0044	0,0015	0,0037	0,0065	0,0491	0,0042	0,0295	0,0901	0,1509
Vauldalen	0,0038	0,0030	0,0044	0,0064	0,1187	0,0069	0,0151	0,0554	0,0283

stanice	6. 12.	25. 12.	10. 1.	27. 1.	7. 2.	20. 2.	13. 3.	27. 3.	4. 4.
Grimsa snøpute	0,0020	0,0000	0,0020	0,0096	0,0154	0,0035	0,0559	0,0080	0,0132
Nordre Osa	0,0028	0,0040	0,0028	0,0200	0,0229	0,0069	0,0113	0,0805	0,0241
Kvarstad.²⁾	0,0025	0,0025	0,0049	0,0052	0,0610	0,0090	0,0704	0,0293	0,1255
Lybekk.³⁾	0,0000	0,0000	0,0177	0,0222	0,0059	0,0037	0,0276	0,0000	0,0000
Brunkollen Klima	0,0000	0,0000	0,0877	0,1951	0,1205	0,0316	0,0315	0,0000	0,0000
Grytå	0,5000	0,0055	0,0270	0,0678	0,1860	0,0124	0,1445	0,1589	0,2529
Breidvatn	0,0112	0,0155	0,0344	0,0194	0,1180	0,1337	0,1866	0,0489	0,2158
Groset	0,0031	0,0028	0,0055	0,0079	0,0228	0,0136	0,1130	0,0409	0,5000
Skurdevikåi	0,0208	0,0141	0,0148	0,0158	0,0809	0,0399	0,0527	0,0174	0,1220
Bakko	0,0071	0,0104	0,0108	0,0109	0,0794	0,0234	0,0665	0,0478	0,0480
Kyrkje.⁴⁾	0,0095	0,0066	0,0082	0,0097	0,0588	0,0351	0,0911	0,0205	0,0437
Sognefjellet snøpute	0,0231	0,0188	0,0122	0,0274	0,0752	0,0738	0,2277	0,0524	0,6687
Anestølen	0,0280	0,0177	0,0080	0,0239	0,0454	0,2114	0,5556	0,0407	0,0785
Hestavollen	0,0937	1,0061	0,0756	0,1319	0,1061	0,6380	0,0704	0,0516	1,5538
Vetlebotn	0,0240	0,0292	0,0138	0,0723	0,3386	0,0503	0,3974	0,0589	1,2291

pozn.: ¹⁾ Svarttjornbekken, ²⁾ Kvarstadseter, ³⁾ Lybekkbraten, ⁴⁾ Kyrkjestolane

Po zjištění dosahu vlivu pozemní stanice použitím interpolace Thiessenovými polygony byly vybrány funkcí Select by Location vždy body patřící do regionu dané stanice. Tyto body měly známou jasovou teplotu a byly převedeny z rastru rozdílů těchto teplot funkcí Raster to Point. Těmto vybraným bodům byl vždy přiřazen koeficient a podle data a místa. Byla použita rovnice (4), popsána výše, v atributové tabulce vytvořen nový sloupec s vodní hodnotou sněhu, která byla vypočtena pro všechny body. Po přiřazení vodní hodnoty sněhu každému z bodů byly tyto body opět převedeny funkcí Point to Raster s velikostí pixelu 0,1 bodu na rastr. Výsledné mapy vodní hodnoty sněhu pro 9 různých dní během zimního období 2015-2016 jsou v příloze č. 1 jako mapy č. 1 - 9. Mapy jsou převedeny do Mercatorova zobrazení, konkrétně UTM 33.

Z mapy č. 1 je patrné, že na začátku zimy jsou sice téměř $\frac{3}{4}$ norského území s určitou vrstvou sněhové pokrývky, nicméně vodní hodnota sněhu je spíše nižší. Na jihu území není žádná, stejně tak na západním pobřeží, kde působí vliv Severoatlantského proudu. Vodní hodnota sněhu je vyšší v hornatých oblastech, především v okolí stanic Hestavollen, Vetlebotn a Skurdevikåi a v okolí 2, kde je vyšší nadmořská výška kolem 2 000 m n. m.

Mapa č. 2 z 25. prosince ukazuje, že pravděpodobně došlo k tání sněhu, jelikož se rozšířilo nepokryté území a naopak v některých oblastech vzrostla vodní hodnota.

V oblasti Namsvatn tunnel Vekteren je zjištěná vodní hodnota sněhu abnormálně vysoká. Může to být dáno příliš nízkou nebo naopak příliš vysokou sněhovou pokrývkou, kdy začínají být data naměřená radiometrem zkreslená.

Na mapě č. 3 už jsou pod sněhem i nížinaté oblasti okolí Brunkollen Klima v blízkosti hlavního města Oslo. Nejvyšší vodní hodnota sněhu je naměřena v severní části země a dále opět ve výše položených nadmořských výškách. Západní pobřeží je, stejně jako v předchozích mapách, bez sněhové pokrývky. Na tuto skutečnost působí i fakt, že pobřeží je velice členité s množstvím fjordů, kdy se kvůli velikosti pixelů nedá příliš dobře rozlišit, kam až zasahuje voda.

Z mapy č. 4 lze vyčíst, že 27. 1. 2016 ve střední části Norska nebyla žádná souvislá sněhová pokrývka, tudíž ani žádná vodní hodnota sněhu, naopak na severu území, především v okruhu vlivu stanice Ovre Leirbotn, byla zjištěna vodní hodnota sněhu vyšší než 1 000 mm. Jižní část území vykazuje podobný trend jako v předchozích mapách – na západním a jižním pobřeží bez sněhu. Tentokrát byla zjištěna menší území s vodní hodnotou sněhu i v okolí Brunkollen Klima.

Mapa č. 5 znázorňuje velký pokles vodní hodnoty sněhu v porovnání s mapou č. 4. Především v jižní části je převážná většina území bez sněhové pokrývky. Na severu ale vidíme souvislou sněhovou pokrývku.

Z mapy č. 6 je patrné, že v tento den bylo v Norsku nejvíce sněhu z celého zkoumaného období. Sněhová pokrývka zakrývala převážnou část země, a proto jsou i dostupné údaje o vodní hodnotě sněhu z většiny území. Výjimku tvoří pouze jižní a západní pobřeží. Největší vodní hodnota je naměřena na vysoko položených stanicích Anestolen, Hestavollen a Vetlebotn, nejnižší hodnoty potom ve středu země.

Mapa č. 7 zobrazuje vodní hodnotu sněhu z 13. 3. 2016. Oproti předpokladům, že by právě v půlce března měla vodní hodnota sněhu narůstat, je naopak v tomto případě skoro půl země s nulovou hodnotou. Může to být dáno příliš vysokou sněhovou pokrývkou, kde měření mikrovlnného radiometru způsobí chybu a v odečtení dvou spektrálních kanálů potom vznikne záporná hodnota, tudíž i celý výsledek je záporný a je brán, jako by na daném místě sníh nebyl (Chang, 1987). Nebo mohlo dojít k velkému oteplení a sníh na území Norska roztál.

Z mapy č. 8 můžeme vyčíst, že na severu země byla zjištěna vysoká vodní hodnota sněhu, protože 27. 3. už dochází k roztátí sněhové pokrývky a objem vody ve sněhu se zvyšuje. Ve střední části pak není souvislá pokrývka, to samé na jihu země v okolí stanic Lybekkbraten a Kvarstadseter.

Jako poslední datum zkoumání byl zvolen 4. duben 2016 (viz mapa č. 9). Z mapy je patrné, že na norském území už se vyskytovala souvislá pokrývka jen v severní části. Vodní hodnota sněhu pak byla nižší než na mapě v mapě č. 8. Ve střední části pak je vysoká vodní hodnota, ale nesouvisle rozmístěná. To samé v jižní části země.

5. Diskuze

V této kapitole bude zhodnocena kvalita a dostupnost dat, postup v praktické části a na závěr porovnány dosažené výsledky s jinými mapami, konkrétně s mapami vodní hodnoty sněhu pro území Norska z pozemních stanic a mapou Evropy vytvářenou EUMETSATem.

5.1 Data a metodika

Původním záměrem bylo provést mapování vodní hodnoty sněhu pro střední Evropu nebo jen pro Česko. To se však ukázalo jako problematické, jelikož nejsou dostupná data pro konkrétní pozemní stanice. Také data z radiometrů mají malé rozlišení a s velikostí pixelu 11 km x 11 km by celé jedno pohoří spadlo do malého množství pixelů. Bylo tedy třeba vybrat území o větší rozloze s dobrou dostupností dat z pozemních stanic. Jako nejlepší se ve výsledku ukázalo území Norska, které je prostorově rozsáhlé (rozloha je 385 178 km²) a podařilo se i získat dobré údaje z pozemních stanic měřících vodní hodnotu sněhu každý den v průběhu celé zimy.

Záměr práce provést metodu HUT nemohl být uskutečněn, jelikož tento model je velice složitý a obsahuje vstupní data o sněhu, která nejsou k dispozici. Bylo tedy přikročeno ke zjednodušení a pro zjištění vodní hodnoty sněhu. Byla použita metoda, kterou popisuje Chang (1987).

5.2 Porovnání výsledků s interpolovanými mapami pozemního měření

Výsledky byly porovnány s mapami NVE. Tyto mapy vznikají z údajů modelů předpovídajících počasí a z interpolací mezi bodovými měřeními. Do výpočtu vstupují i parametry jako je výška sněhu, teplota sněhu i vzduchu, tání, výška nového sněhu aj. K dispozici pak jsou mapy vodní hodnoty sněhu pro každý kilometr čtvereční norského území.

Bylo zvoleno dvanáct pixelů, ve kterých byla zjištěna vodní hodnota sněhu na mapách vodní hodnoty sněhu z dat mikrovlnného radiometru a na shodném území na interpolovaných mapách pozemních měření v Norsku. Tyto body jsou uvedeny

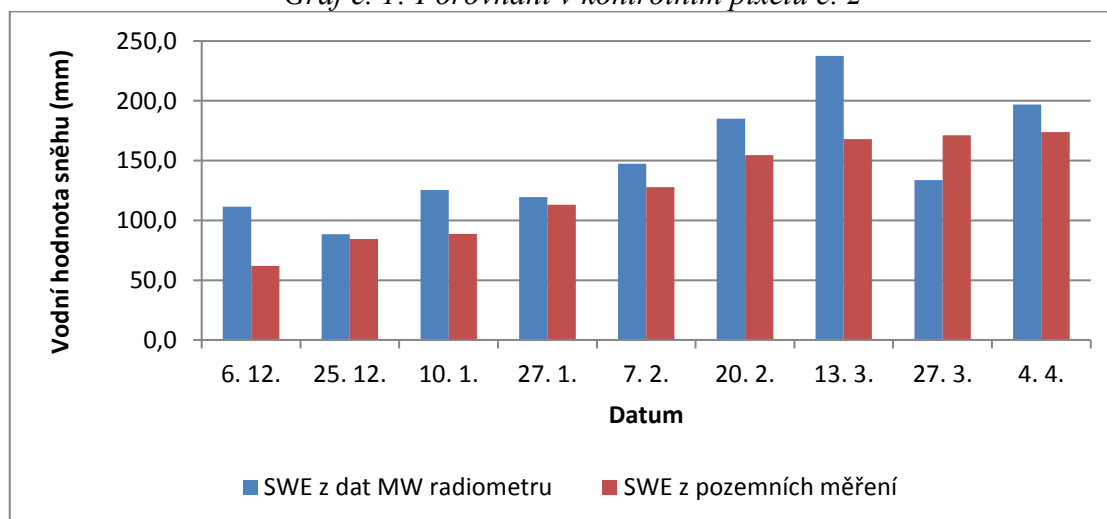
v Tabulce č. 5. Zeměpisné souřadnice jsou uvedeny v intervalu, který označuje rozmezí jednoho pixelu ve vytvořených mapách. Pro porovnání s norskými mapami bylo třeba z těchto map vzít daný počet pixelů a ze zjištěných hodnot vypočítat průměr.

Tabulka č. 5: Zeměpisné souřadnice pixelů

číslo pixelu	zem. délka	zem. šířka
1	22,85-22,95	69,65-69,75
2	24,65-24,75	69,05-69,15
3	17,95-18,05	68,95-69,05
4	16,05-16,15	67,75-67,85
5	14,65-14,75	66,35-66,45
6	13,05-13,15	64,65-64,75
7	11,05-11,15	63,25-63,35
8	08,95-09,05	62,95-63,05
9	11,65-11,75	62,15-62,25
10	10,05-10,15	60,55-60,65
11	08,05-08,15	59,85-59,95
12	06,85-06,95	60-75-60,85

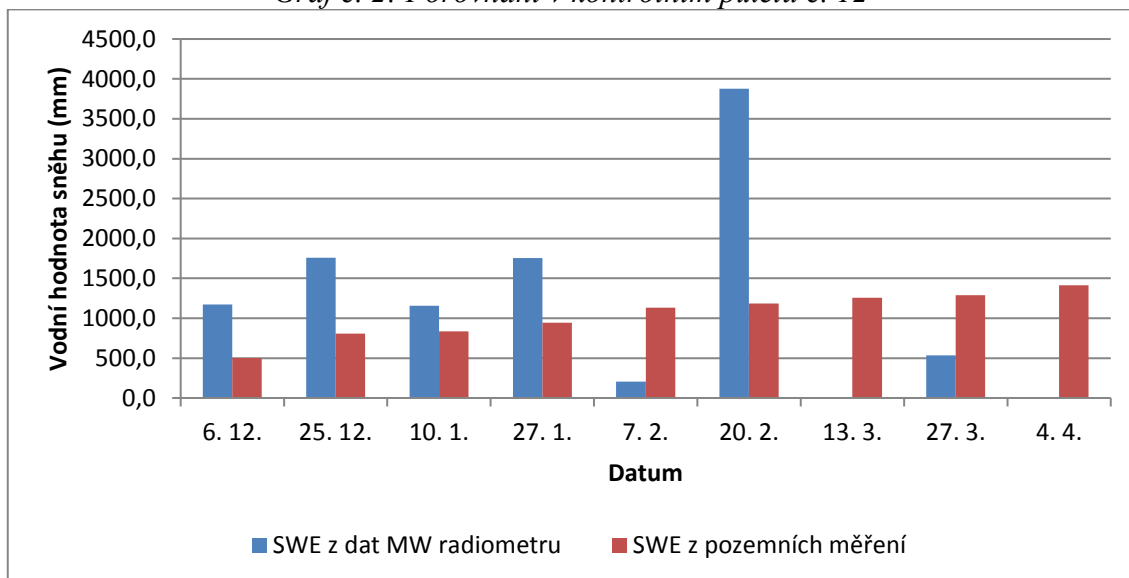
Pro každý zkoumaný den bylo uděláno v daném pixelu porovnání mezi hodnotami SWE. Grafy pro každý pixel jsou uvedeny v příloze. V pixelu č. 2 bylo dosaženo nejlepší shody mezi oběma hodnotami (viz Graf č. 1) ve všech zkoumaných dnech. Odchyly jsou pouze v řádech desítek milimetrů.

Graf č. 1: Porovnání v kontrolním pixelu č. 2



Oproti pixelu č. 2, kde byla měření podobná, došlo v pixelu č. 12 k větším odchylkám, a to až v řádu tisíce milimetrů (viz Graf č. 2). Může to být způsobeno umístěním tohoto pixelu blízko fjordu ve vysoké nadmořské výšce.

Graf č. 2: Porovnání v kontrolním pixelu č. 12



Mezi jednotlivými měřeními v každém bodě byla provedena korelace, aby bylo zjištěno, v kterém bodě bylo dosaženo nejlepší shody mezi oběma měřeními. Korelace je vzájemný vztah mezi veličinami a dosahuje hodnot -1 až 1, kdy hodnoty blízké 1 na sobě závisí, pokud je hodnota kladná, jde o závislost přímou, pokud je hodnota záporná, jedná se o závislost nepřímou. Pokud se korelační koeficient pohybuje v okolí 0, hodnoty nevykazují závislost. Výsledky korelace jsou uvedeny v Tabulce č. 6.

Tabulka č. 6: Korelační koeficient obou měření v jednotlivých pixelech

číslo pixelu	korelační koeficient
1	0,7400478
2	0,7763436
3	0,1267453
4	0,1291916
5	-0,5112082
6	-0,3655892
7	0,1707573
8	-0,0665877
9	0,5245161
10	0,0672339
11	0,3178591
12	-0,2582361

Dle předpokladů by na sobě hodnoty měly silně přímo záviset. Jak je patrné z Tabulky č. 6, o silnou přímou závislost se jedná jen u pixelů č. 1, 2 a 9. U ostatních pixelů se vodní hodnota vypočítaná z dat mikrovlnného radiometru od dat z pozemního měření značně lišila.

Při tvorbě map vodní hodnoty sněhu mohlo dojít k nepřesnostem. Jejich příčinou mohlo být více faktorů. Jako první z nich to mohla být nedokonalá metoda určování vodní hodnoty sněhu z dat mikrovlnného radiometru, která byla pro účely této práce značně zjednodušená a neuvažovala vlastnosti sněhu jako takové. Dalším důvodem zkreslení hodnot v konkrétních pixelech mohlo být rozlišení radiometru, které je v tomto případě v konečném výsledku $0,1^\circ$ (asi 11,1 km). Při počítání koeficientu a pak došlo k případům, kdy pro danou stanici vyšel 0. Znamenalo to, že v konkrétním bodě měření nebyla žádná vodní hodnota sněhu. Tím pádem byla nula i v oblasti vlivu pozemní stanice, což ve skutečnosti nemusela být pravda. Oblast vlivu se určovala Thiessenovými polygony. Ty způsobují na některých mapách ostré hrany mezi jednotlivými územími, které nebyly nijak ošetřeny.

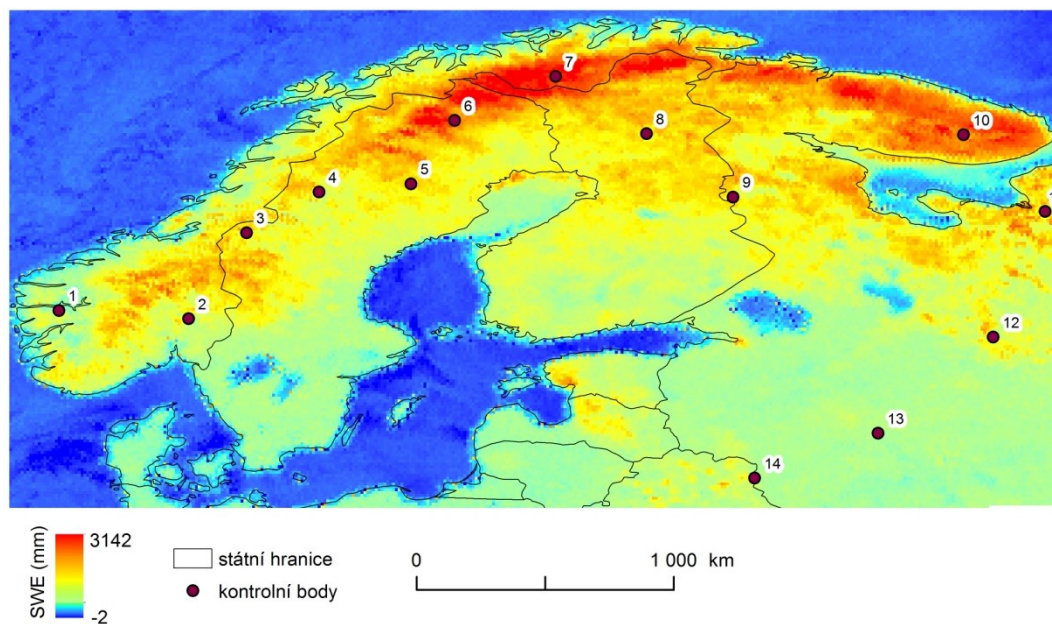
5.3 Porovnání s metodou EUMETSATu

Pro porovnání metody použité v této práci s metodou, kterou používá EUMETSAT při tvorbě svého produktu s údaji o vodní hodnotě sněhu SN-OBS-4, byl vytvořen rastr oblasti Skandinávie a pobaltských států. Byl zvolen 5. březen 2016. Při zjišťování vodní hodnoty sněhu z dat mikrovlnného radiometru byla použita metoda, která je popsána v kapitole 3. Nebyly však k dispozici údaje z pozemních stanic na celém území, a proto byl jako koeficient a zvolen průměr ze všech spočítaných koeficientů pro pozemní stanice v Norsku. Tato hodnota se rovná

$$a = 0,078894167$$

Následný postup pro vypočítání vodní hodnoty sněhu byl stejný jako pro norské území. Výsledek je patrný na Obrázku č. 10. Velikost jednoho pixelu je $0,1^\circ$ (asi 11,1 km).

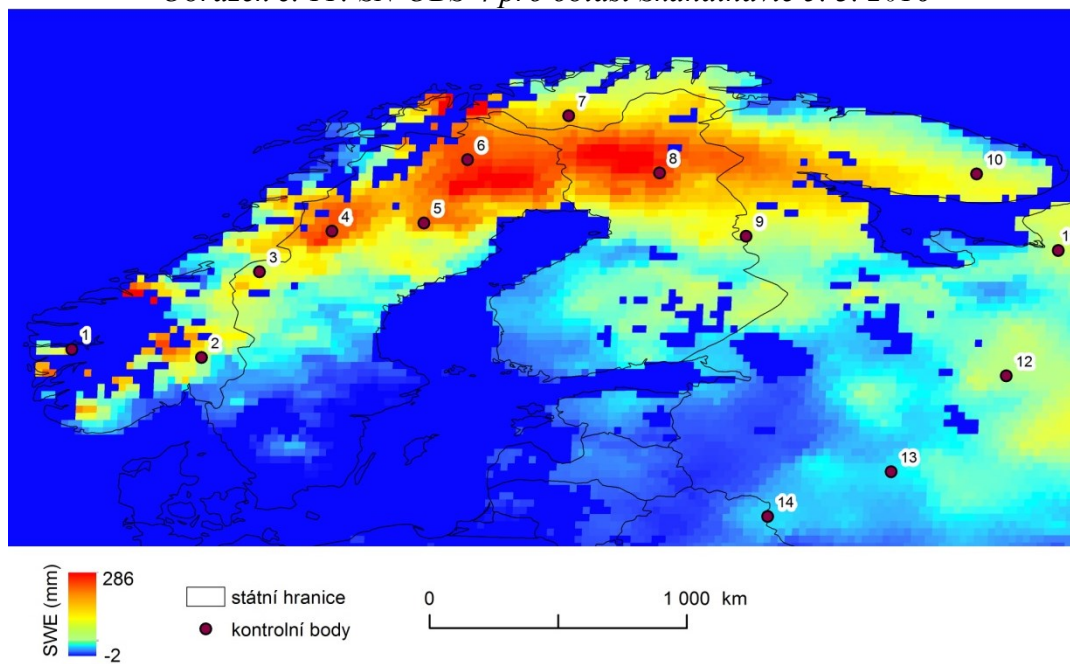
Obrázek č. 10: Vodní hodnota sněhu na území Skandinávie 5. 3. 2016



Zdroj: GCOM-W1 (2017), vlastní zpracování

Výsledná hodnota SWE byla následně porovnávána s již zmíněným produktem, kde ke zjištění vodní hodnoty sněhu používají HUT snow emission model, jehož princip je popsán výše. Rozlišení je ~20 km (HSAF 2012). Produkt SN-OBS-4 je zobrazen na Obrázku č. 11.

Obrázek č. 11: SN-OBS-4 pro oblast Skandinávie 5. 3. 2016



Zdroj: H-SAF Product Download Centre (2017), vlastní zpracování

Ve 14 kontrolních bodech byla zjištěna vodní hodnota sněhu. Jak je patrné z Tabulky č. 7, výsledky se od sebe značně liší. Při provedení korelace byla ale prokázána slabá závislost, korelační koeficient je roven $0,46752531$.

Tabulka č. 7: Porovnání vodní hodnoty sněhu

číslo pixelu	vlastní metoda	EUMETSAT
1	35	166
2	303	146
3	677	128
4	777	221
5	1109	190
6	2166	216
7	2466	171
8	675	217
9	629	137
10	1841	138
11	642	122
12	561	114
13	11	70
14	228	66

pozn.: hodnoty jsou uvedeny v mm

6. Závěr

Cílem této práce bylo na základě dostupných dat z pozemních stanic a mikrovlnného radiometru vypočítat vodní hodnoty sněhu pro zvolené území a následně vytvořit tematické mapy pro hodnocené období. Cíle byly splněny použitím jednoduché metody pro zjištění vodní hodnoty sněhu. Byly vytvořeny mapy pro devět dní ze zimního období 2015/2016. I přes nedostatky zvolené metody byly vytvořeny mapy, které ilustrují rozložení vodní hodnoty sněhu na norském území. Ke zpřesnění výsledků by jistě pomohly parametry, jako je tvar reliéfu nebo zahrnutí vlivu vegetace na vodní hodnotu sněhu, které ve svých výpočtech zahrnuje EUMETSAT.

Při porovnání vytvořených map s mapami s interpolovanými údaji z pozemních stanic, které mají lepší rozlišení, ale došlo ke zjištění, že hodnoty v kontrolních pixelech se od sebe liší. Uspokojivého výsledku bylo dosaženo jen ve 4 pixelech, kdy byla hodnota korelačního koeficientu větší než 0,5. V některých kontrolních pixelech byla dokonce korelace opačná. Některé značné odchylky by se daly vysvětlit vlivem počasí na měření radiometru (například silný vítr), nebo polohou pixelu. Je také třeba říci, že ani data z map s interpolovanými hodnotami nemusí být přesná a nemusí postihnout všechny odchylky, které se týkají vodní hodnoty sněhu na určitém území.

Ještě horších výsledků bylo dosaženo v porovnání s produktem z EUMETSATu. Zde byla zaznamenána velká odchylka v měřeních ve všech 14 kontrolních pixelech. Je sice prokázána jistá závislost mezi oběma výsledky, ale některé z hodnot jsou od sebe naprosto odlišné. Může to být dáno horším rozlišením produktu, ale především volbou koeficientu, který byl průměrem pro konkrétní území a ne pro celou Skandinávii.

Závěrem by se dalo říci, že metoda použita v této práci pro zjišťování vodní hodnoty sněhu z dat mikrovlnného radiometru není příliš přesná. Po přidání dalších parametrů sněhu by však mohla být zdokonalena a více zpřesněna. Zároveň však bylo prokázáno, že i základní metodou se z dat mikrovlnného radiometru dá, za pomoci údajů z pozemních stanic měřících vodní hodnotu sněhu, ukázat rozložení vodní hodnoty na vybraném území.

Zjišťování vodní hodnoty sněhu z dat mikrovlnných radiometrů je již dlouhou dobu trvající proces, kdy se instituce v Americe i v Evropě snaží o zdokonalení a zpřesnění zavedených postupů. Ukazuje se ale, že tato hodnota závisí na mnoha faktorech a vlastnostech sněhu, které jsou bez pomoci pozemního měření obtížně zjištělné.

Seznam použité literatury

CHANG, A. T. C., FOSTER, J. L., HALL, D. K. (1987): Nimbus-7 SMMR Derived Global Snow Cover Parameters. *Annals of Glaciology*, Vol. 9, s. 39-44.

CLIFFORD, D. (2010): Global estimates of snow water equivalent from passive microwave instruments: History, challenges and future developments. *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 31, No. 14, s. 3707 – 3726.

CNES (Centre National D'Etudes Spatiales, 2017): Parasol. Dostupné z: <https://parasol.cnes.fr/en/PARASOL/index.htm> [cit. 22. 3. 2017].

DEPARTMENT OF GEOLOGY (2017): Spectral reflectance of land covers. Dostupné z: <http://www.geol-amu.org/notes/mlr-1-8.htm> [cit. 21. 3. 2017].

EUMETSAT (2017a): Operating satellites. Dostupné z: <http://www.eumetsat.int/website/home/AboutUs/WhatWeDo/OperatingSatellites/index.html> [cit. 9. 4. 2017].

EUMETSAT (2017b): Satellite application facilities. Dostupné z: <http://www.eumetsat.int/website/home/Satellites/GroundSegment/Safs/index.html> [cit. 9. 4. 2017].

EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY (2017): Norway shapefile. Dostupné z: <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/eea-reference-grids-2/gis-files/norway-shapefile> [cit. 8. 5. 2017].

GCOM-W1 (2017): Data providing service. Dostupné z: <https://gcom-w1.jaxa.jp/auth.html> [cit. 8. 5. 2017].

HALL, D., KELLY, R., RIGGS, G., CHANG, A., FOSTER, J., (2002): Assessment of the relative accuracy of hemispheric-scale snow-cover maps. *Annals of Glaciology*, 34, s. 24–30.

HALL, D., MARTINEC, J. (1985): Remote sensing of ice and snow. Chapman and Hall Ltd, New York, USA, 183 s., ISBN-13: 978-94-010-8647-9.

HSAF (2017a): Overview. Dostupné z: <http://hsaf.meteoam.it/overview.php> [cit. 12. 4. 2017].

- HSAF (2017b): SN-OBS-4, z 11. 4. 2017. Dostupné z: http://hsaf.meteoam.it/imm_resiz.php?im=products/h13/h13_20170411_day_merged.png [cit. 12. 4. 2017].
- HSAF (2012): Product User Manual (PUM) for product H13-SN-OBS-4. Snow water equivalent by MW radiometry. EUMETSAT Satellite Application Facility on Support to Operational Hydrology and Water Management. 24 s.
- HSAF (2010): Algorithm Theoretical Definition Document (ATDD) for product SN-OBS-4 – Snow water equivalent by MW radiometry. The EUMETSAT Network of Satellite Application Facilities. 28 s.
- H-SAF PRODUCT DOWNLOAD CENTRE (2017): H-SAF online archive. Dostupné z: http://hsaf.meteoam.it/user_support.php [cit. 8. 5. 2017].
- JAXA (2016): Data Users' Manual for the Advanced Microwave Scanning Radiometer 2 onboard the Global Change Observation Mission 1st – Water „SHIZUKU“ (GCOM-W1). Japan Aerospace Exploration Agency. 3rd Edition, 256 s.
- KOLÁŘ, J., HALOUNOVÁ, L., PAVELKA, K. (2000): Dálkový průzkum Země 10. Vydavatelství ČVUT, Praha, 164 s. ISBN 80-01-01567.
- LABGUIDE (2017): Fluorchromy. Dostupné z: <http://labguide.cz/fluorochromy/> [cit. 20. 3. 2017].
- NASA (2017): Aqua Earth - observing Satellite Mission. Dostupné z: <https://aqua.nasa.gov/> [cit. 22. 3. 2017].
- NASA (2012): Description of GCOM – W1. Dostupné z: <https://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/spacecraftDisplay.do?id=2012-025A> [cit. 12. 3. 2017].
- NOVÁK, M. (2014): Monitorování sněhové pokrývky metodou EIS pro možnost stanovení vodní hodnoty sněhu. Diplomová práce. VUT Brno, Fakulta stavební, Ústav vodních staveb. 85 s.
- NSIDC (2017a): All about snow: Types of snow. Dostupné z: <http://nsidc.org/cryosphere/snow/science/types.html> [cit. 21. 3. 2017].

- NSDIC (2017b): Passive microwave. Dostupné z: https://nsidc.org/cryosphere/seaice/study/passive_remote_sensing.html [cit. 21. 3. 2017].
- NSDIC (2017c): Overview. Dostupné z: <http://nsidc.org/data/amsre> [cit. 12. 4. 2017].
- PULLIAINEN, J. (2006): Mapping of snow water equivalent and snow depth in boreal and sub-arctic zones by assimilating space-borne microwave radiometer data and ground-based observations. *Remote Sensing of Environment*, 101, s. 257-269.
- REMOTE SENSING SYSTEMS (2017a): Brightness temperature. Dostupné z: <http://www.remss.com/measurements/brightness-temperature> [cit. 22. 3. 2017].
- REMOTE SENSING SYSTEMS (2017b): SSMI / SSMIS. Dostupné z: <http://www.remss.com/missions/ssmi> [cit. 22. 3. 2017].
- ROBINSON, D. A., DEWEY, K. F., HEIM, R. R. (1993): Global snow cover monitoring: An update. *Bulletin of the American Meteorological Society*, Vol. 74, No. 9: s. 1689–1696.
- ROY, V., GOITA, K., ROYER, A., WALKER, A. E., GOODISON, B. E. (2004): Snow water equivalent retrieval in a Canadian environment from microwave measurements using the HUT snow emission model. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 42, No. 9, s. 1850-1859.
- SENORGE (2017): seNorge: Sno. Dostupné z: <http://www.senorge.no/index.html?p=senorgeny&st=snow> [cit. 8. 5. 2017].
- SHI, J. Ch., XIONG Ch., JIANG L. M. (2016): Review of snow water equivalent microwave remote sensing. *Science China Earth Sciences*, Vol. 59, No. 4: s. 731-745.
- SPECTRAL REFLECTANCE CHARACTERISTICS (2017): Spectral Reflectance Characteristics of Water. Dostupné z: <http://web.pdx.edu/~emch/rs/vh5.html> [cit. 1. 5. 2017].
- ŠPÁTOVÁ, Z. (2010): Využití dat dálkového průzkumu Země pro určování vodní hodnoty sněhu. Diplomová práce. Univerzita Karlova v Praze, Přírodovědecká fakulta, Katedra aplikované geoinformatiky a kartografie. 121 s.

ŠPULÁK, O., SOUČEK, J., ČERNOHOUS, V. (2012): Pozemní metody a technologie měření vodní hodnoty sněhu: review. Zprávy lesnického výzkumu, 57, č. 4: s. 304-313.

TEDESCO, M., WANG, J. R. (2006): Atmospheric Correction of AMSR-E Brightness Temperatures for Dry Snow Cover Mapping. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 5 s.

TONG, J., VELICOGNA, I. (2010): A Comparison of AMSR-E/Aqua Snow Products with in situ Observations and MODIS Snow Cover Products in the Mackenzie River Basin, Canada. Remote Sensing, 2, s. 2313-2322. ISSN: 2072-4292.

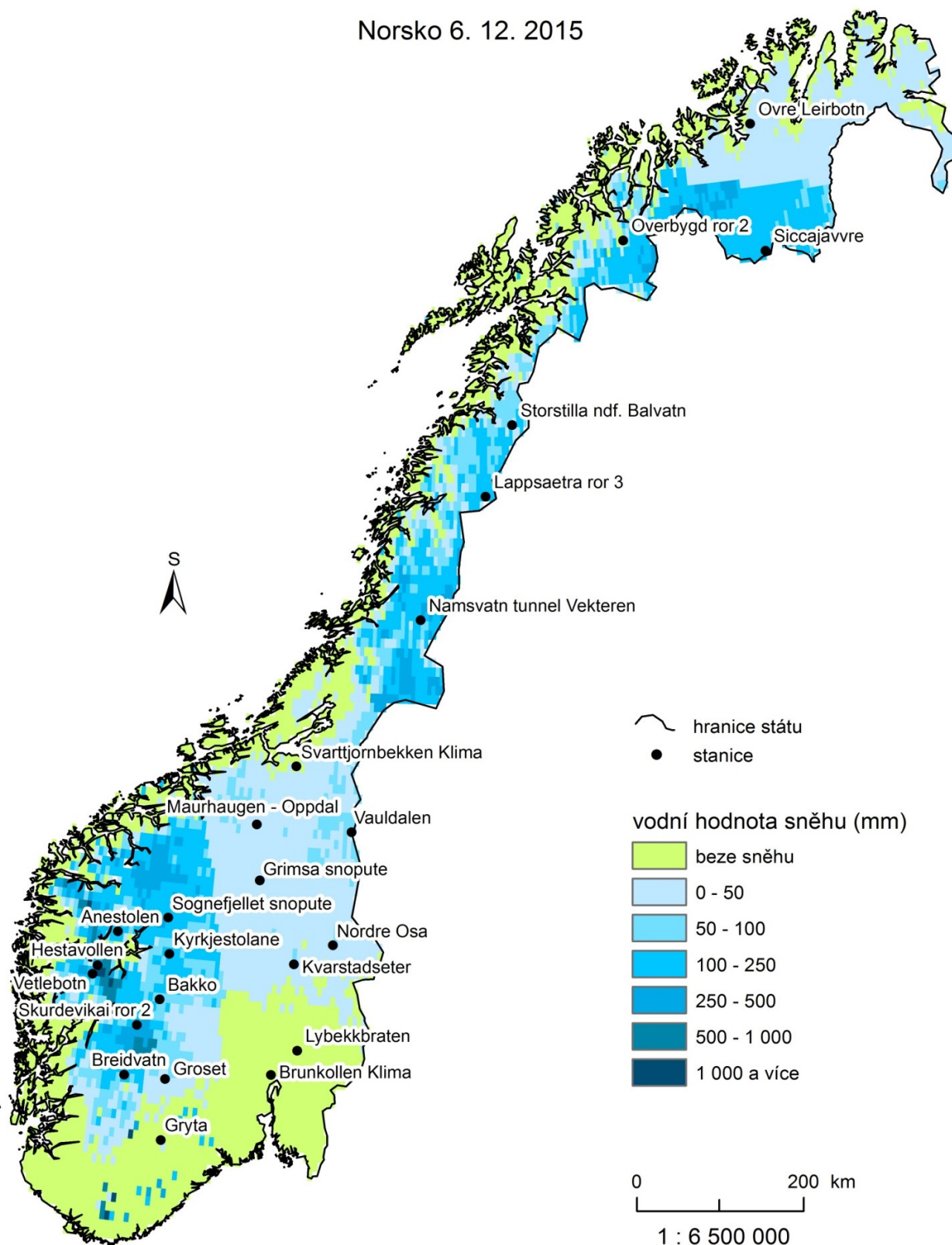
Seznam příloh

Příloha č. 1: Mapy vodní hodnoty sněhu pro devět dní v zimním období 2015/16	45
Příloha č. 2: Grafy porovnání měření vodní hodnoty sněhu v kontrolních pixelech	54

Příloha č. 1: Mapy vodní hodnoty sněhu pro devět dní v zimním období 2015/16
 Mapa č. 1:

VODNÍ HODNOTA SNĚHU

Norsko 6. 12. 2015

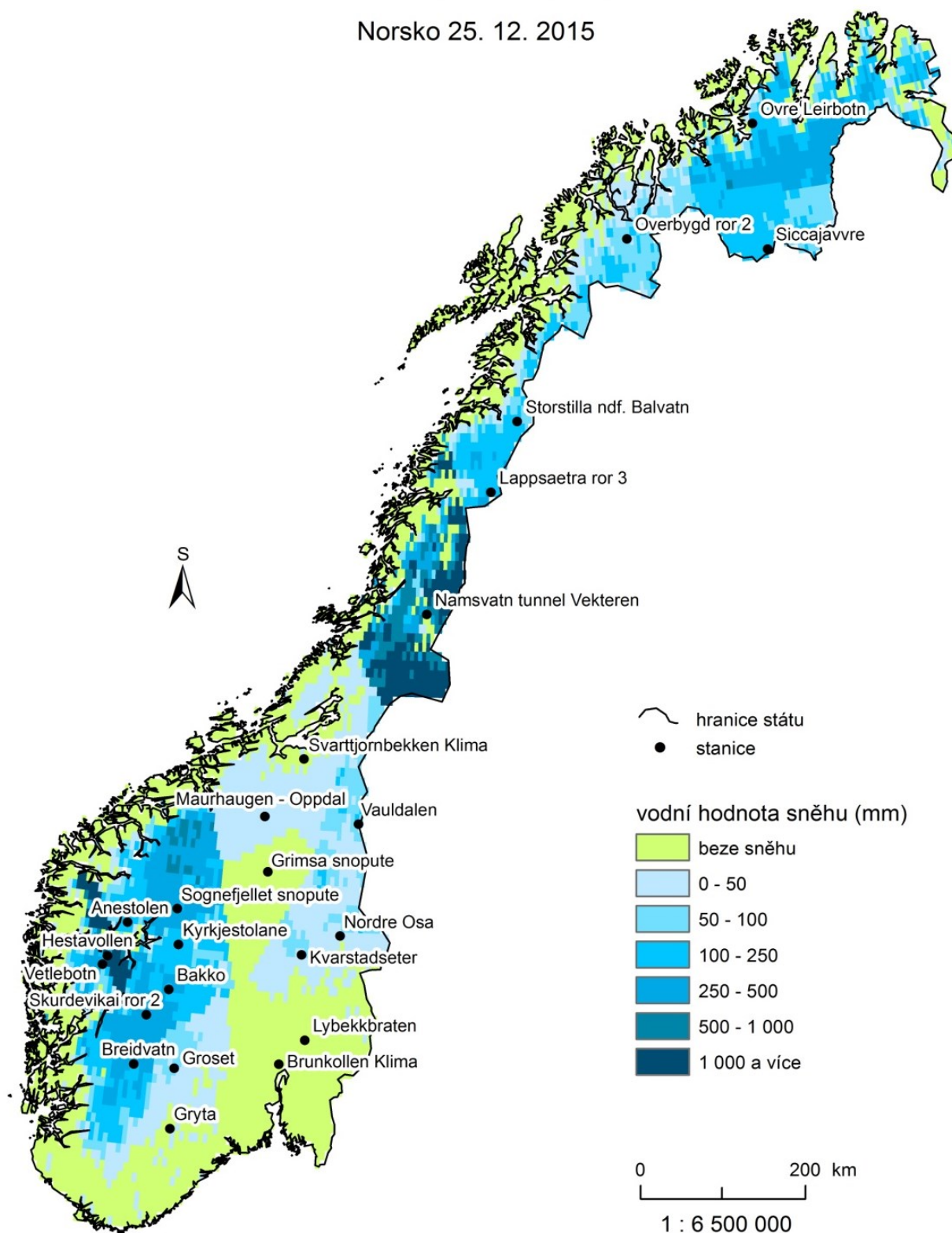


Tereza KLÍMOVÁ
 Zdíkov 2017

Mapa č. 2:

VODNÍ HODNOTA SNĚHU

Norsko 25. 12. 2015

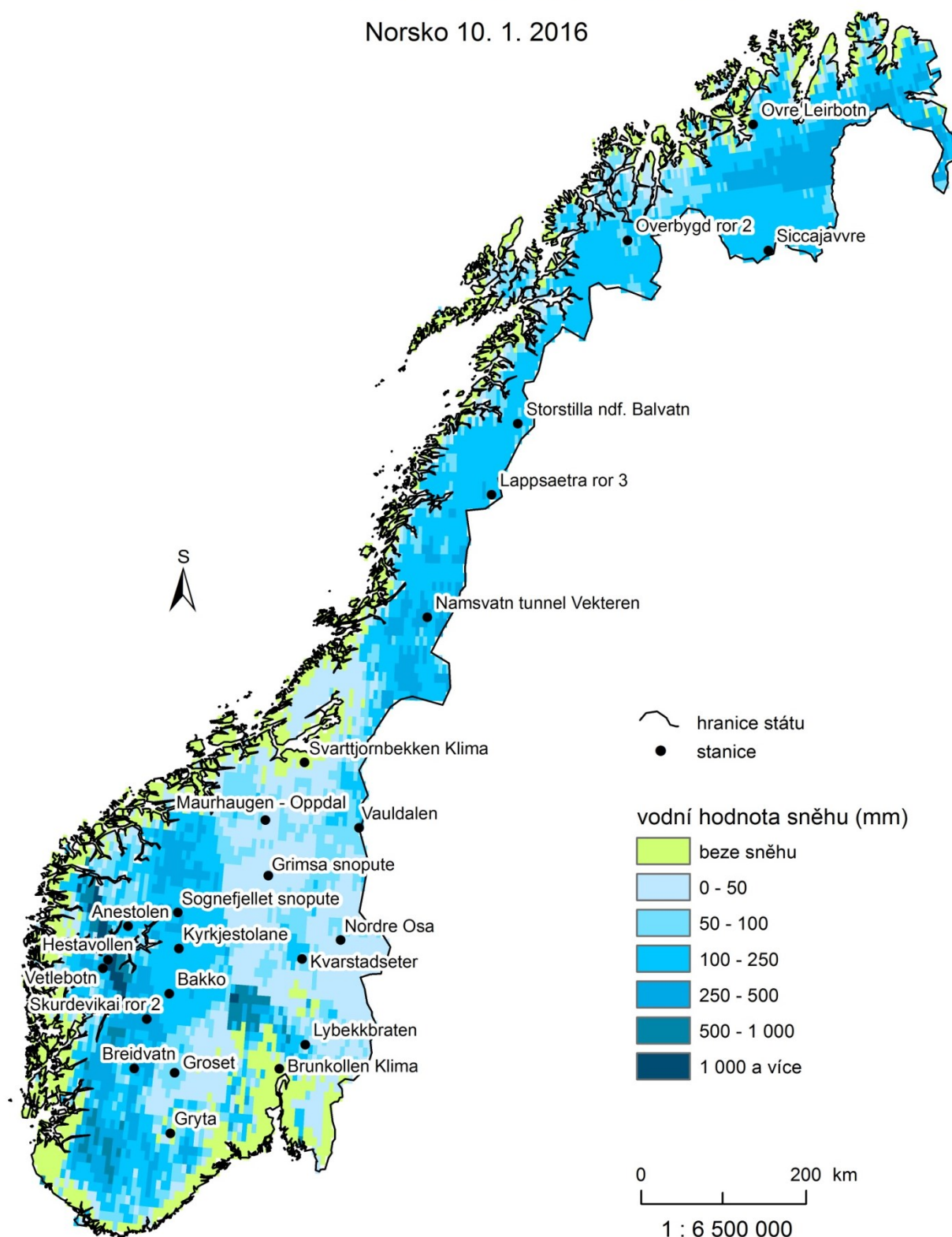


Tereza KLÍMOVÁ
Zdík 2017

Mapa č. 3:

VODNÍ HODNOTA SNĚHU

Norsko 10. 1. 2016



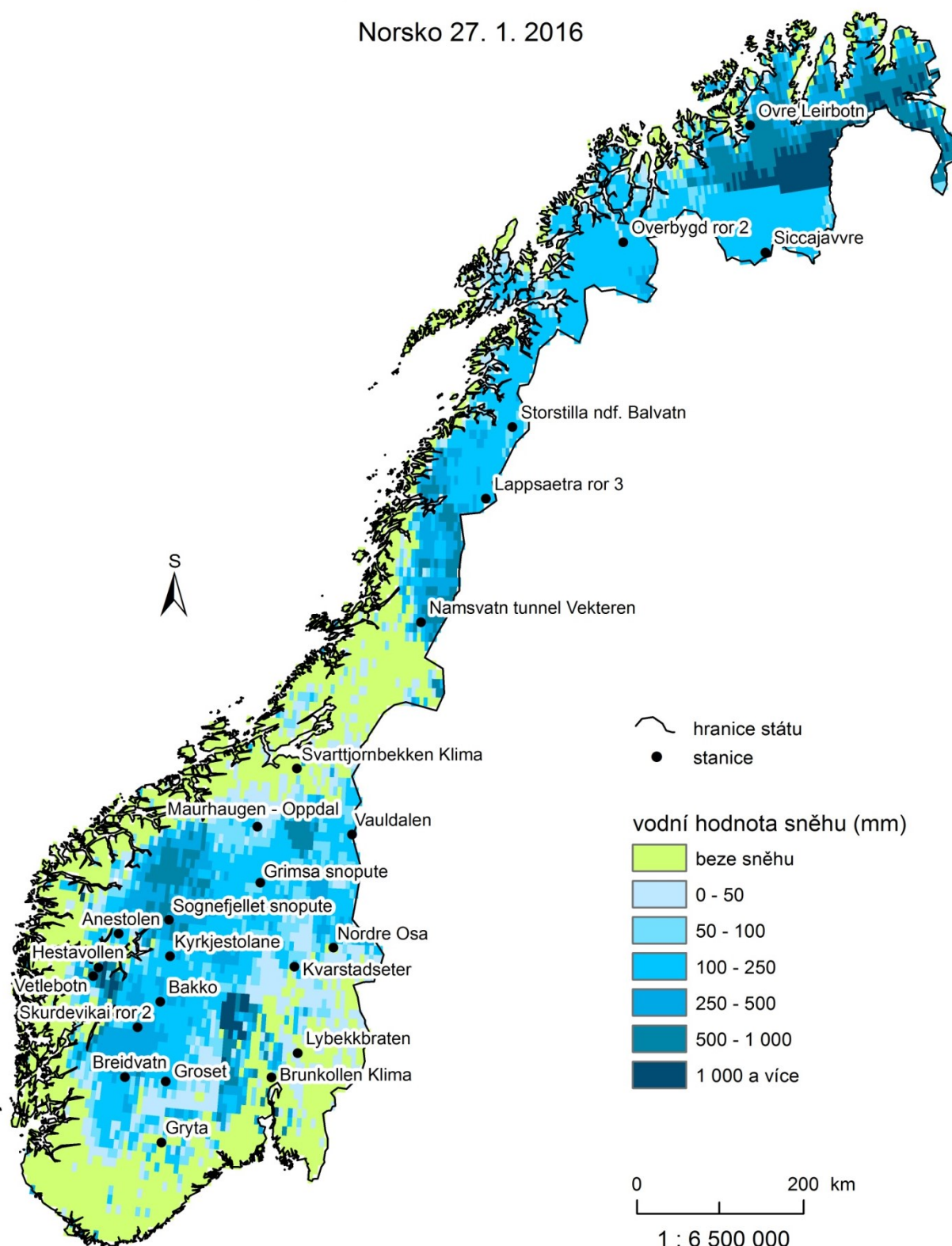
Tereza KLÍMOVÁ
Zdikov 2017

Zdroj: EEA (2017), GCOM-W1 (2017), seNorge (2017), vlastní zpracování

Mapa č. 4:

VODNÍ HODNOTA SNĚHU

Norsko 27. 1. 2016



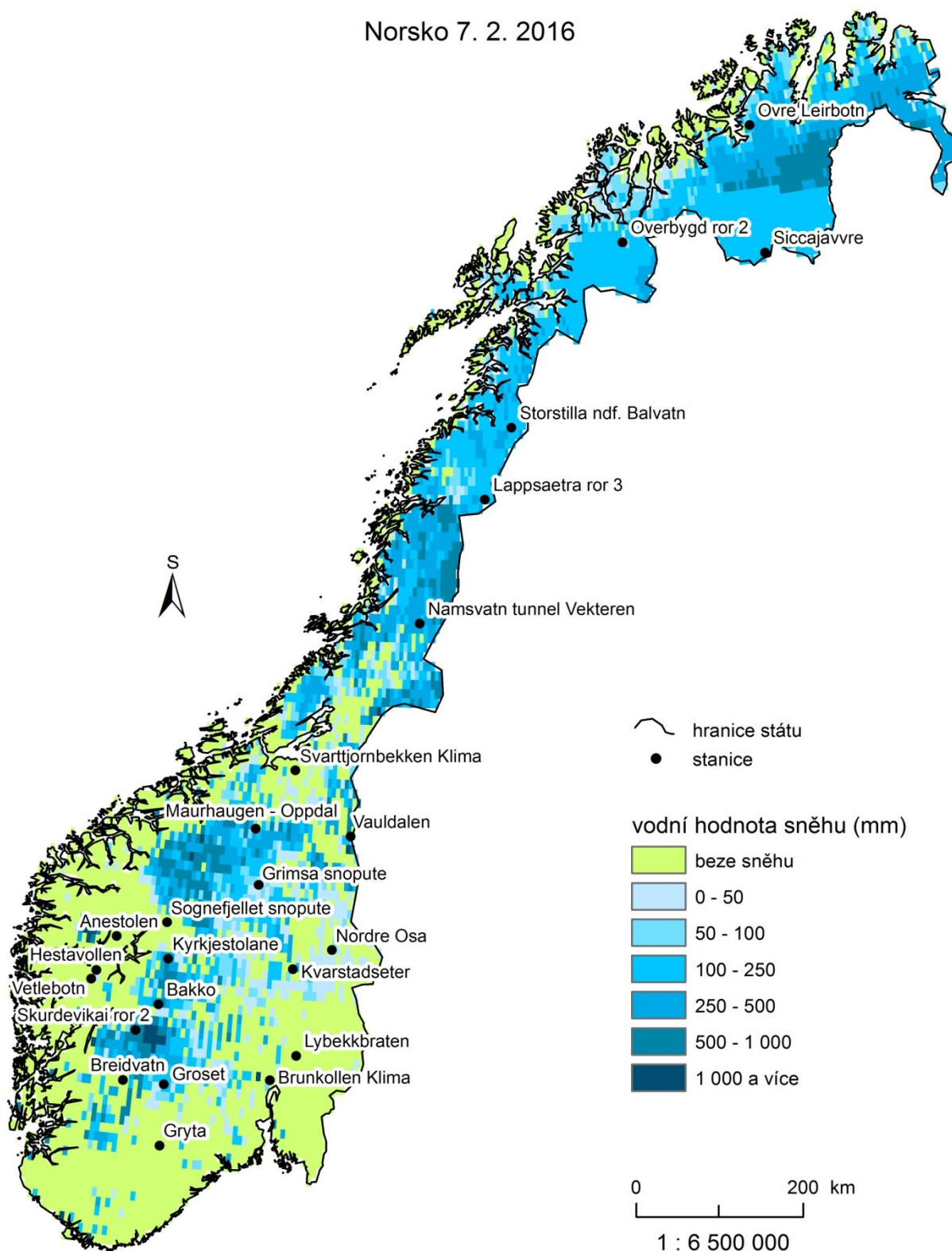
Tereza KLÍMOVÁ
Zdík 2017

Zdroj: EEA (2017), GCOM-W1 (2017), seNorge (2017), vlastní zpracování

Mapa č. 5:

VODNÍ HODNOTA SNĚHU

Norsko 7. 2. 2016



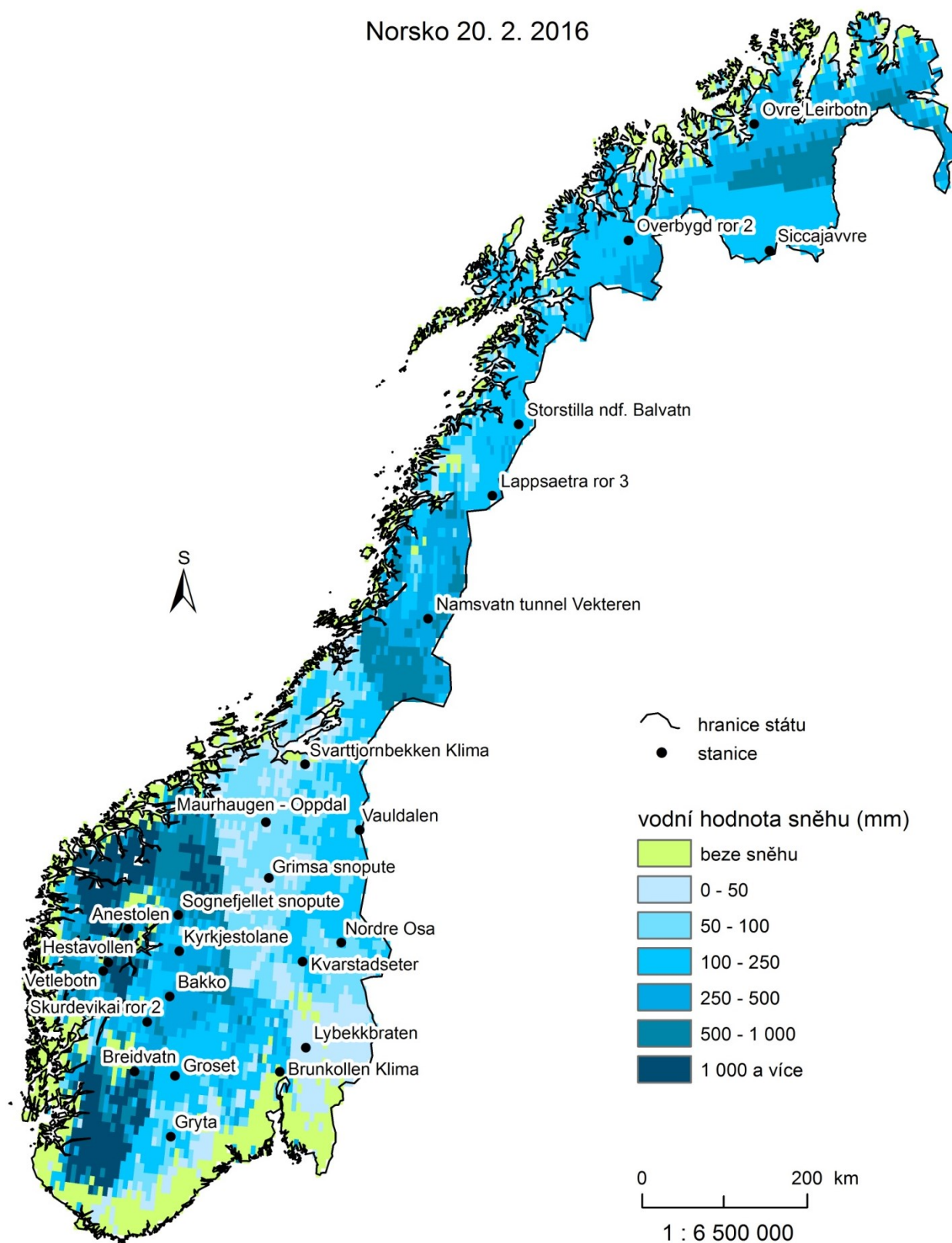
Tereza KLÍMOVÁ
Zdíkovi 2017

Zdroj: EEA (2017), GCOM-W1 (2017), seNorge (2017), vlastní zpracování

Mapa č. 6:

VODNÍ HODNOTA SNĚHU

Norsko 20. 2. 2016



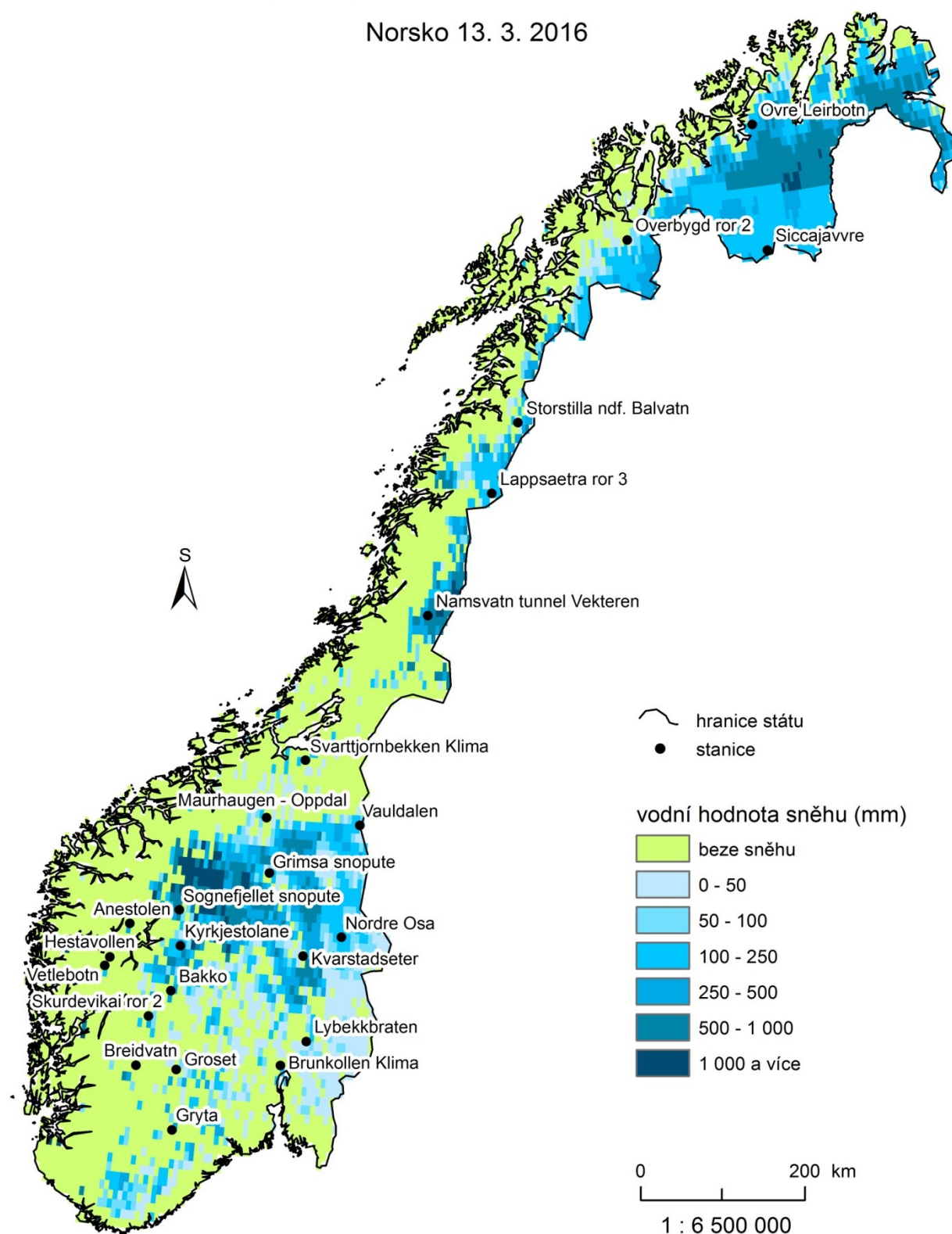
Tereza KLÍMOVÁ
Zdíkov 2017

Zdroj: EEA (2017), GCOM-W1 (2017), seNorge (2017), vlastní zpracování

Mapa č. 7:

VODNÍ HODNOTA SNĚHU

Norsko 13. 3. 2016

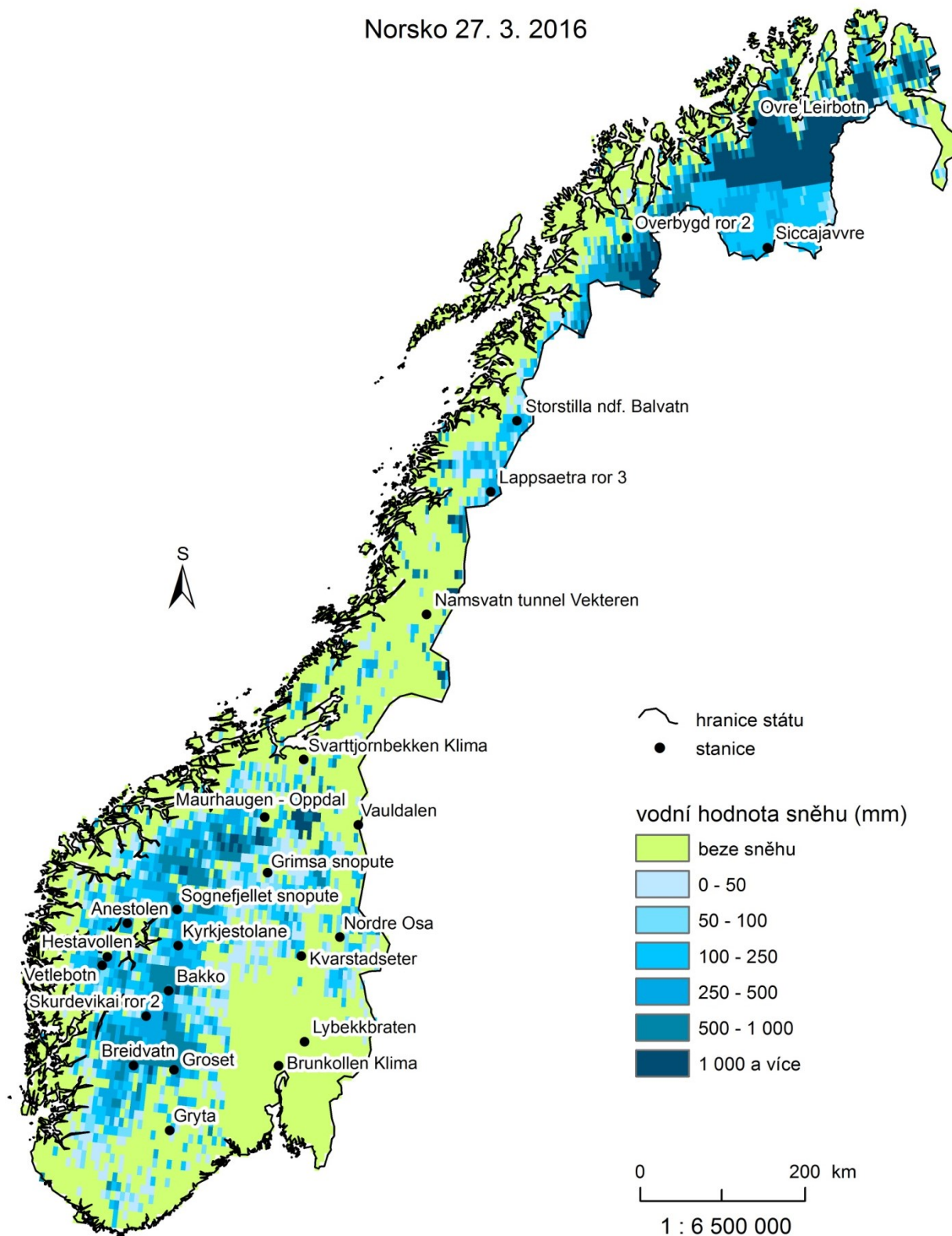


Tereza KLÍMOVÁ
Zdíkov 2017

Mapa č. 8:

VODNÍ HODNOTA SNĚHU

Norsko 27. 3. 2016



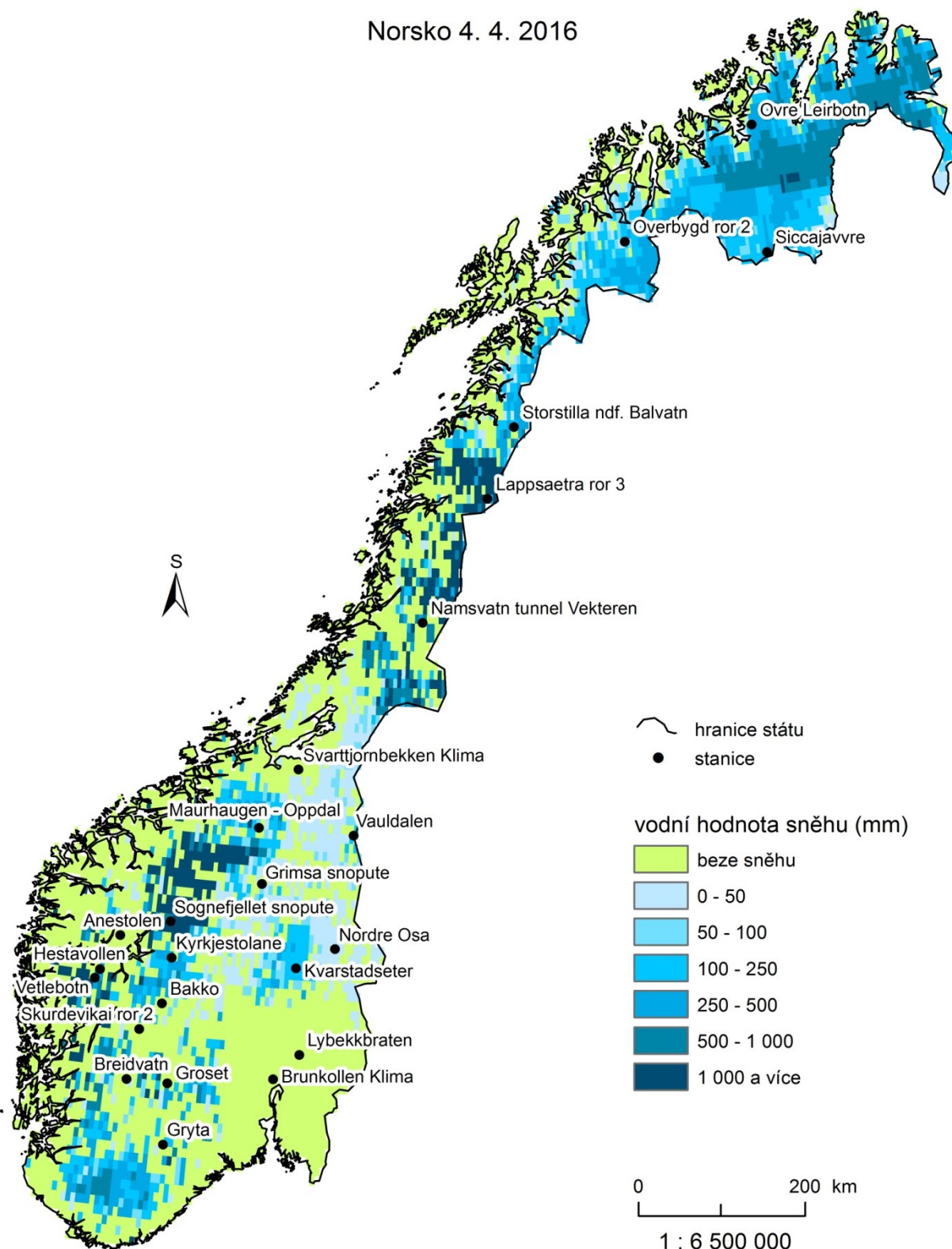
Tereza KLÍMOVÁ
Zdíkov 2017

Zdroj: EEA (2017), GCOM-W1 (2017), seNorge (2017), vlastní zpracování

Mapa č. 9:

VODNÍ HODNOTA SNĚHU

Norsko 4. 4. 2016

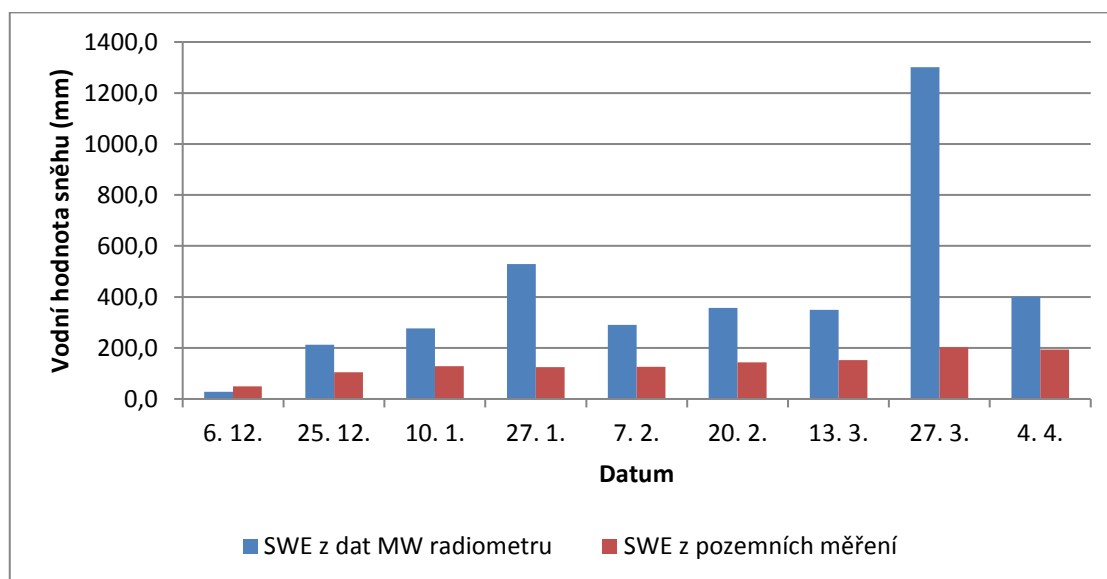


Tereza KLÍMOVÁ
Zdíkov 2017

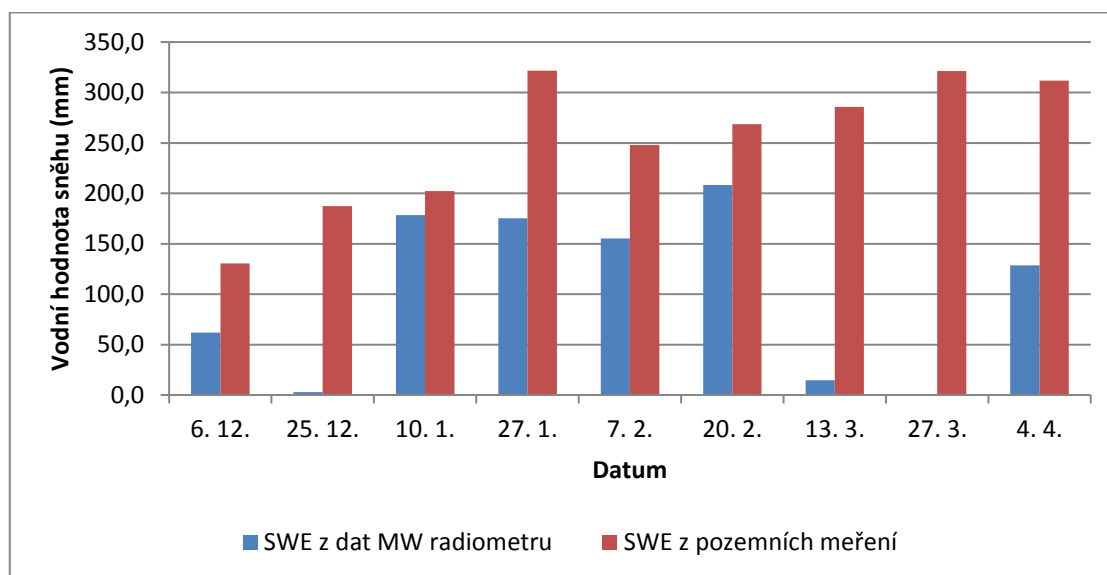
Zdroj: EEA (2017), GCOM-W1 (2017), seNorge (2017), vlastní zpracování

Příloha č. 2: Grafy porovnání měření vodní hodnoty sněhu v kontrolních pixelech

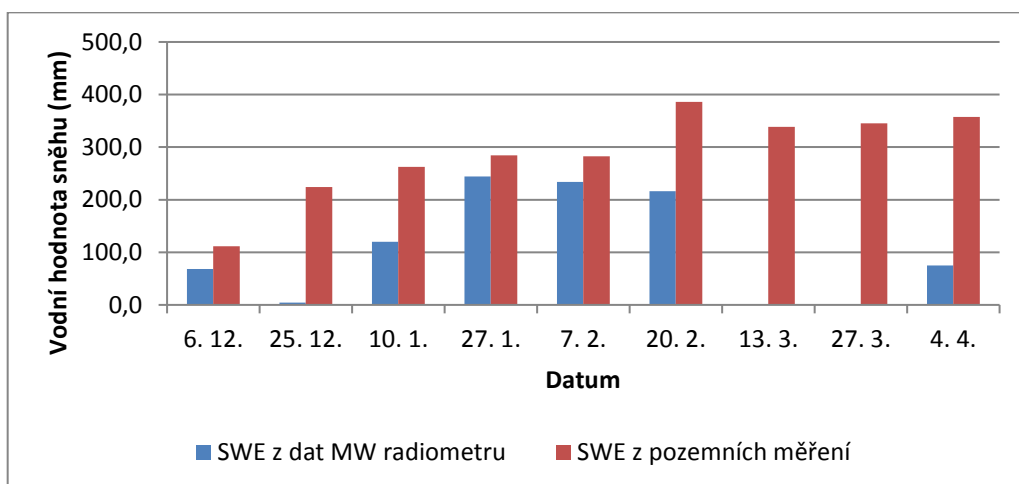
Graf č. 1: Porovnání v kontrolním pixelu č. 1



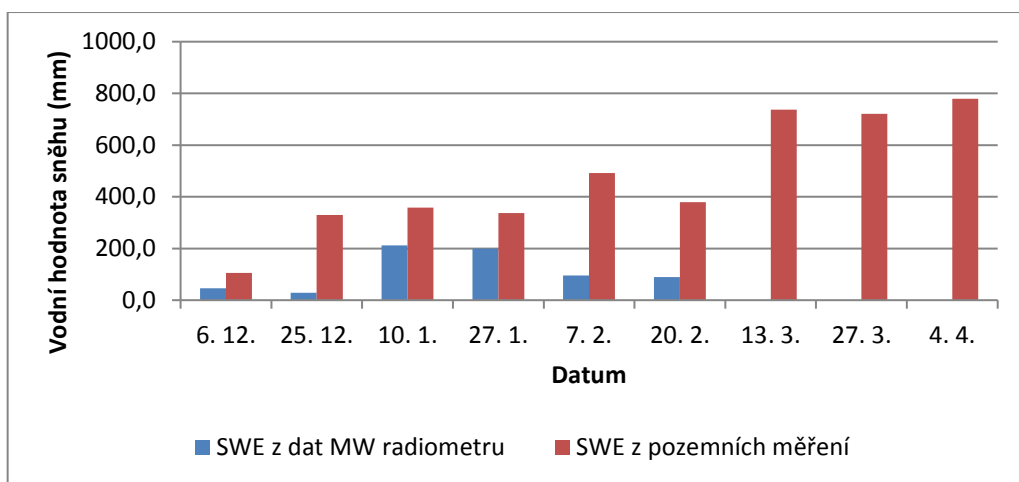
Graf č. 2: Porovnání v kontrolním pixelu č. 3



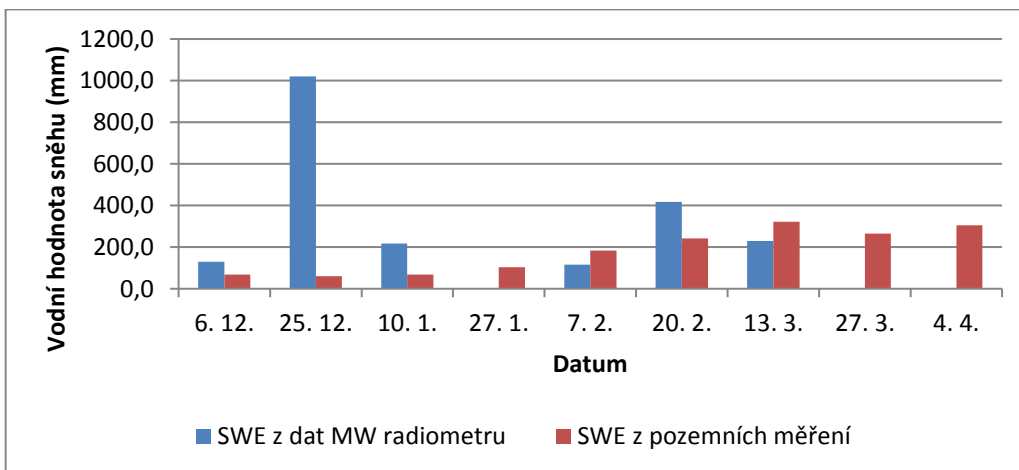
Graf č. 3: Porovnání v kontrolním pixelu č. 4



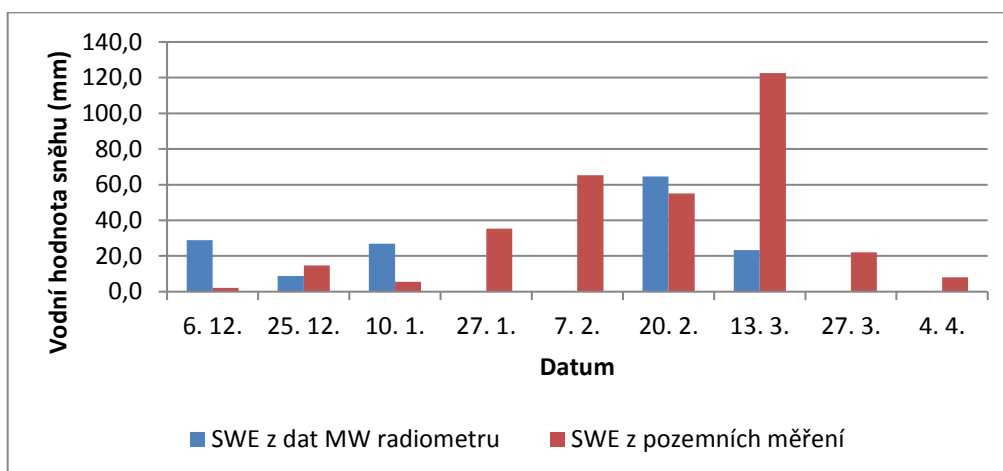
Graf č. 4: Porovnání v kontrolním pixelu č. 5



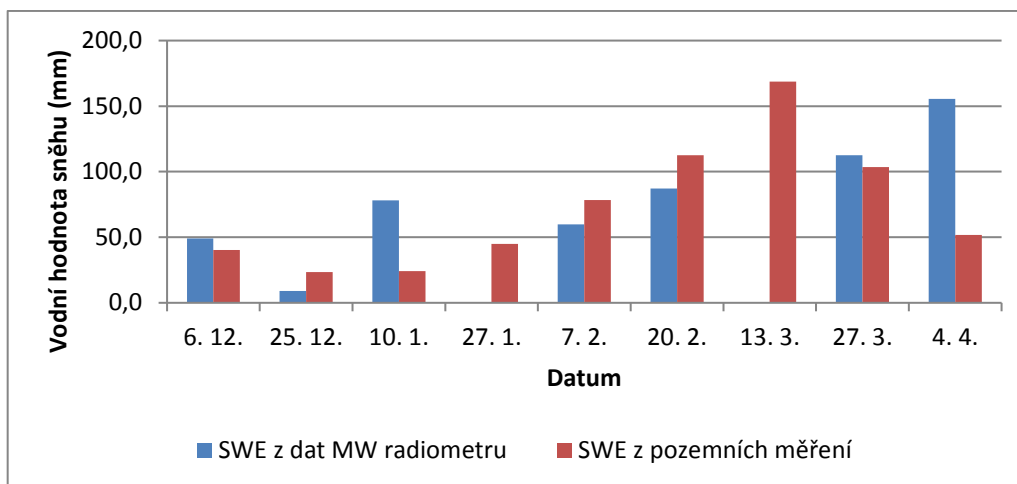
Graf č. 5: Porovnání v kontrolním pixelu č. 6



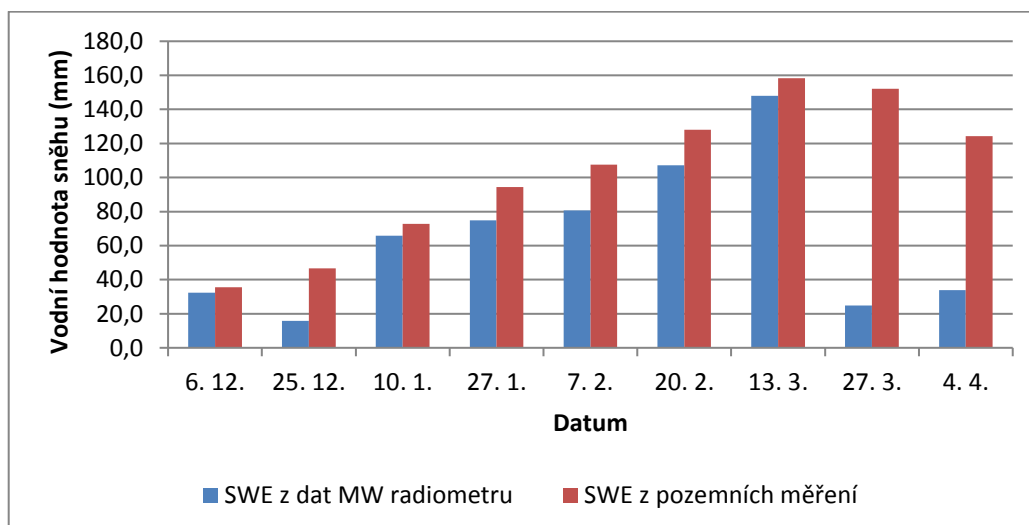
Graf č. 6: Porovnání v kontrolním pixelu č. 7



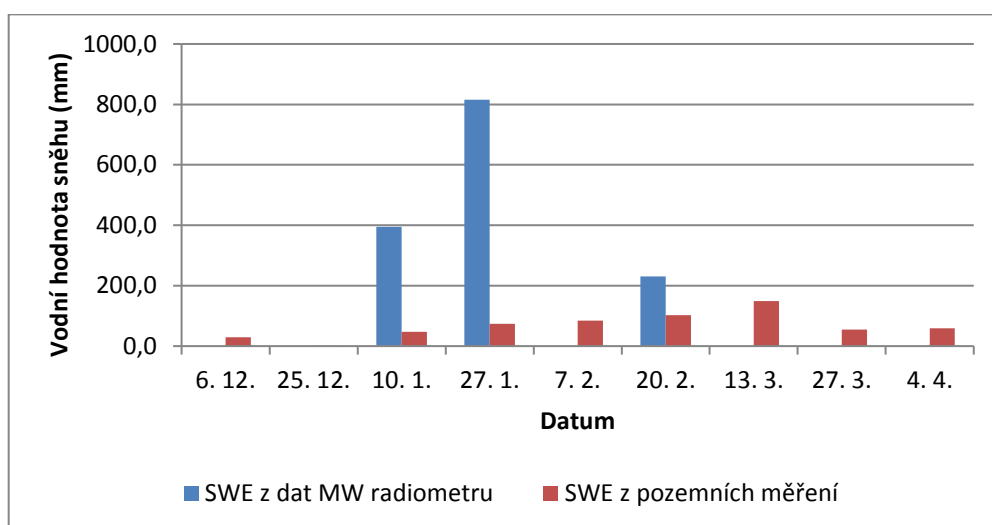
Graf č. 7: Porovnání v kontrolním pixelu č. 8



Graf č. 8: Porovnání v kontrolním pixelu č. 9



Graf č. 9: Porovnání v kontrolním pixelu č. 10



Graf č. 10: Porovnání v kontrolním pixelu č. 11

